

**PEM YAKIT HÜCRESİNİN MESKEN BESLEME SİSTEMİNDE  
KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muzaffer AKTAŞ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

Ocak 2022

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**PEM YAKIT HÜCRESİNİN MESKEN BESLEME SİSTEMİNDE**  
**KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**Muzaffer AKTAŞ**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI**

**Ocak 2022**

## TEZ ONAY SAYFASI

Muzaffer AKTAŞ tarafından hazırlanan “PEM yakıt hücresinin mesken besleme sisteminde kullanılması üzerine bir araştırma” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Mühendisliği Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Zafer ORTATEPE  
Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Emre Akarlan  
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN  
AKÜ, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

..... /..... /..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**

### **Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**17 / 01 / 2022**

**Muzaffer AKTAŞ**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PEM YAKIT HÜCRESİNİN MESKEN BESLEME SİSTEMİNDE KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Muzaffer AKTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOĞAN

Yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmanın önemi günden güne artmaktadır. Buna ek olarak elektrik enerjisinin her bir son kullanıcıya kadar ulaştırılmasında bazı fiziksel ve ekonomik anlamda zorluklar bulunmaktadır. Bu durumların aşılabılmesinde en önemli etken izole bir şekilde beslenebilen son kullanıcıyı oluşturmaktır.

Bu araştırmada, şebekeden izole ve batarya destekli PEM yakıt hücresi kullanarak enerjisini sağlayan bir son kullanıcı profili, oluşturulan farklı kullanım koşulları kapsamında simülasyon ortamında incelenmiştir. Gerçekte uygulanması düşünülen sistemler simülasyon ortamına aktarılmış ve böylece son kullanıcının beslenmesi sağlanmıştır. Burada, batarya bloğunun derin deşarj ve aşırı şarjlarını önlemek adına kritik durumlar olarak belirlenen minimum %40 ve maksimum %90 şarj durumları için yakıt hücresinin devrede kalması sağlanmış ve bunlara ait simülasyon sonuçları verilmiştir. Sonrasında ise batarya destekli yakıt hücreli bir besleme sistemi için güncel fiyatlar ile ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetlerinin analizleri yapılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

**2022, viii + 38 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** İzole sistem, PEM yakıt hücresi, maliyet analizi, mesken yükleri.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **INVESTIGATION OF THE HYBRID USE OF PEM FUEL CELL AT RESIDENTIAL POWER SYSTEM**

Muzaffer AKTAŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Renewable Energy Systems

**Supervisor:** Asst. Prof. Rasim DOĞAN

The importance of using renewable energy sources is increasing day by day. In addition, there are some physical and economic difficulties in delivering electrical energy to each end user. The most important factor in overcoming these situations is to create the end user who can feed in isolation.

In this research, an end-user profile, which is isolated from the grid and provides its energy by using a battery-backed PEM fuel cell, has been examined in the simulation environment within the scope of the scenarios created. The systems that are intended to be implemented in reality have been transferred to the simulation environment, thus feeding the end user. Here, in order to prevent deep discharge and overcharging of the battery block, the fuel cell is kept in operation for the critical states of minimum 40% and maximum 90% charge, and the simulation results are given. Afterwards, the current prices and initial investment, operation and maintenance costs for a battery-assisted fuel cell supply system are analyzed and the results are presented.

**2022, viii + 38 pages**

**Keywords:** Cost analysis, isolated system, PEM fuel cell, residential loads.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Rasim DOğAN'a ve her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını grdğim hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Muzaffer AKTAŞ

Afyonkarahisar, 2022

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	3
2.1 Hidrojen .....	5
2.2 Yakıt Hücreleri .....	7
2.2.1 Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi.....	9
2.2.2 Alkali Yakıt Hücresi .....	10
2.2.3 Fosforik Asit Yakıt Hücresi.....	10
2.2.4 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi .....	10
2.2.5 Katı Oksit Yakıt Hücresi .....	11
3. MATERYAL ve METOT.....	12
3.1 Batarya Bloğu .....	12
3.2 Yakıt Hücresi Bloğu .....	13
3.3 İnvörtör Bloğu.....	15
3.4 Yük Tespiti .....	16
3.5 Simülasyon .....	17
3.5.1 Düşük Güç Talebi .....	18
3.5.2 Orta Güç Talebi .....	19
3.5.3 Yüksek Güç Talebi .....	20
4. BULGULAR.....	21
4.1 Düşük Güç Talebi Durumu.....	21
4.2 Orta Güç Talebi Durumu .....	23
4.3 Yüksek Güç Talebi Durumu .....	25
4.4 Maliyet Analizi .....	27
4.4.1 İlk Yatırım Maliyeti.....	28



4.4.2 İşletme Maliyetleri.....	29
4.4.3 Bakım Giderleri .....	32
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	33
6. KAYNAKLAR .....	35
ÖZGEÇMİŞ.....	38

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

₺	Türk Lirası
\$	Amerikan Doları
h	Saat
V	Volt
A	Amper
Ah	Amper saat
mW	miliWatt
W	Watt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
°C	Santigrat derece
mA	Miliamper
µm	mikrometre
mm	milimetre
cm	santimetre
H <sup>+</sup>	Hidrojen iyonu
e <sup>-</sup>	Elektron
O <sub>2</sub>	Oksijen molekülü
H <sub>2</sub> O	Su molekülü
Hz	Hertz
psi	Pound per square inch
bar	Basınç
L	Litre
m <sup>3</sup>	Metreküp
C	Batarya kapasite oranı

### Kısaltmalar

---

AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
NASA	The National Aeronautics and Space Administration
PEM	Polimer Elektrolitik Membran
SOC	State of Charge
YSZ	Yttria Stabilized Zirconia

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yakıt hücresinde elektriğin elektrokimyasal olarak üretilmesi aşamalarının gösterildiği kesiti: (1) yakıt ve hava girişleri, (2) elektrokimyasal reaksiyon, (3) iyonik ve elektronik bağlantı, (4) tahliye hatları.....	7
Şekil 2.2 Yakıt hücresi, batarya ve güneş panellerinin karşılaştırılması.....	8
Şekil 3.1 Batarya destekli yakıt hücresi devresinin blok şeması.....	12
Şekil 3.2 Batarya bloğunun Matlab Simulink ortamında gösterimi.....	13
Şekil 3.3 DuraPEM W240 yakıt hücresi. ....	14
Şekil 3.4 Yakıt hücresinin Akım, Gerilim ve Güç eğrisi. ....	14
Şekil 3.5 Yakıt hücresi bloğunun Matlab Simulink modeli. ....	15
Şekil 3.6 Mervesan 3.000W invertör görüntüsü. ....	16
Şekil 3.7 İnvvertör çıkış gerilimi.....	16
Şekil 3.8 DA-DA yükseltici ve DA-AA dönüştürücü invertör bloğunun modeli. ....	16
Şekil 3.9 Kontrol bloğu akış şeması.....	19
Şekil 4.1 Düşük güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan akım grafikleri.....	22
Şekil 4.2 Düşük güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi.....	22
Şekil 4.3 Düşük güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim. ....	23
Şekil 4.4 Düşük güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.....	23
Şekil 4.5 Orta güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan akım grafikleri. ....	24
Şekil 4.6 Orta güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi. ....	24
Şekil 4.7 Orta güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim.....	25
Şekil 4.8 Orta güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.....	25
Şekil 4.9 Yüksek güç talebi durumunda yakıt hücresi devrede iken oluşan akım grafikleri.....	26
Şekil 4.10 Yüksek güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi.....	26
Şekil 4.11 Yüksek güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim. ....	27
Şekil 4.12 Yüksek güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.....	27

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 3.1</b> DuraPEM W240 çalışma koşulları.....	14
<b>Çizelge 3.2</b> Mesken yükleri ve güç tüketimleri.....	17
<b>Çizelge 3.3</b> Yük kombinasyonları ve nominal güç değerleri. ....	17
<b>Çizelge 4.1</b> Sistemde kullanılan malzemeler ve maliyetleri. ....	29
<b>Çizelge 4.2</b> Farklı güç talep durumları kapsamında aylık toplam enerji tüketimi, çalışma süresi ve işletme maliyetleri. ....	32

## 1. GİRİŞ

Fosil enerji türlerinin giderek azalması yenilenebilir enerjiye olan ilginin artmasına sebep olmuştur. Sadece fosil yakıtların azalması değil ayrıca temiz enerji kaynak arayışı da bu ilginin sebepleri arasındadır. Hidroelektrik, güneş ve rüzgar enerjileri başta olmak üzere çeşitli enerji kaynakları bu ilginin odağında yer almaktadır. Buna ek olarak, yenilenebilir enerji sistemleri elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımının zorlu olduğu ya da yapılamadığı bölgelerde çok daha önemli hale gelmektedir. Bu ise yenilenebilir enerji sistemlerindeki gelişmeler ile, izole mikro şebeke sistemlerine olan ilginin de giderek artması sonucunu doğurmuştur.

Yenilenebilir enerji sistemlerinden rüzgar ve güneş enerjisi, günün belirli vakitlerinde ve değişken bir biçimde karşımıza çıkan enerji kaynaklarıdır. Dolayısıyla, yenilenebilir enerji sistemlerinin tek başına kullanılması her zaman mümkün olmamaktadır. Örnek vermek gerekirse, rüzgar enerjisinden her coğrafi koşulda faydalanılamamaktadır. Güneş enerjisi ise güneşin geliş açısı ve bulunduğu konuma göre verimi değişse de her yerde kullanılacak bir yapıya sahiptir. Fakat bu kullanım, güneşin varlığına bağlı bir kullanım olacaktır. Bu sebeple, özellikle elektrik şebekesinin olmadığı yerlerde elektrik ihtiyacının karşılanması için yenilenebilir enerji kaynaklarının farklı kombinasyonlarda hibrit olarak kullanılması önem arz etmektedir (İnt. Kyn. 1).

Yenilenebilir enerji sistemlerinden birisi olan ve son yıllarda popülerliği giderek artan yakıt hücreleri ise coğrafi konumdan bağımsız olarak hidrojen sağlanabilen her yerde rahatlıkla kullanılabilir. Hem rüzgar hem güneş hem de yakıt hücresi, çıkışında yüklerin ihtiyacı olan gerilim seviyesini direkt olarak veremezler ve bu sebepten dönüştürücü devrelerine gereksinim duyarlar (Doğan ve Karaarslan 2017-1). Sonucunda ise güç elektroniği devreleriyle üretilen gerilim ve akımlar farklı tiplere ve büyüklüklere evrilmelidirler (Doğan ve Karaarslan 2017-2). Ayrıca, dinamik yapılarından dolayı mutlaka kontrol devreleri ile kararlı bir çıkış için izlenmeleri gerekmektedir (Özkara vd. 2017, Karaarslan ve Doğan 2017).

Elektrik enerjinin sağlanmasında birden fazla alternatif bulunabiliyorsa mutlaka ek olarak maliyetinin de göz önüne alınması önem arz etmektedir. Bu tür sistemler ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri bakımından farklılıklar göstermektedir. Fakat karar aşamasında üretilen birim enerji için gereken maliyet etkili olacaktır. Bunlar da göz önüne alınarak sürekli bir enerji arzı için minimum maliyetli çözümler sunmak gerekmektedir.

Tez kapsamında sadece hidrojen enerjisiyle beslenen bir mesken için, sistemin çalışması Matlab Simülink yardımıyla simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Yine benzetimi yapılan sistemin gerçek maliyetleri belirlenerek, sonuçlar hem teknik hem de ekonomik bakımından yorumlanmış ve böylece Polimer Elektrot Membran (PEM) yakıt hücresinin mesken yüklerinde kullanılması analiz edilmiştir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu kısımda öncelikle literatürde yakıt hücresi kullanılarak yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Sonrasında ise tezin ana eksenini oluşturan yakıt hücreleri ve yakıt hücrelerinin enerji kaynağı olan hidrojen üzerine bilgiler verilmiştir.

Yakıt hücresinden elde edilen ısıdan kojenerasyon ile yararlanmak amacıyla Li vd. (2020), sıfır enerjili ev otomasyonu geliştirmişlerdir. Burada, şebeke gerilimi, güneş panelleri ve yakıt hücresi kullanılmıştır. Ayrıca, talep yönetiminin de gerçekleştirildiği ev uygulamasında, yakıt hücrelerinin hem elektrik hem de ısı üretmesinden faydalanılmış ve kojenerasyon uygulaması yapılmıştır. Böylece yüksek CO<sub>2</sub> salınımının önüne geçilerek enerji tasarrufu da sağlanmıştır. Benzer bir kojenerasyon uygulaması Ronaszegi vd. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada foto-elektrokimyasal hidrojen üretiminin bir konut talebini karşılayıp karşılamayacağı araştırılmıştır. Analiz edilen konut hem şehir şebekesinden beslenmiş hem de kojenerasyona sahip bir yakıt hücresi sistemiyle desteklenmiştir. Sonuç olarak, yakıt hücresi ile hem elektrik hem de ısınma ihtiyacının karşılanması sağlanmıştır.

Konut enerji ihtiyacını karşılamak için Sihem vd. (2019), araçtan eve (V2H) uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulamada PEM tipi bir yakıt hücresi, süperkapasitör ve güneş paneli kullanılmıştır. Bu şekilde geliştirilen bir akıllı ev uygulaması ile aşırı hidrojen tüketimi ve süperkapasitörlerin derin deşarjı önlenmesi amaçlanmış ve ayrıca enerji tüketiminde verimlilik artışı sağlanmıştır. Enerjiyi verimli kullanmak adına yapılan bir başka çalışmada Patterson vd. (2015), batarya, güneş paneli ve yakıt hücresinden oluşan bir mikro şebeke modeli geliştirmişlerdir. Burada güneş panelleri ile donatılan konutların farklı saatlerde ortaya çıkan farklı güç ihtiyaçları baz alınmış ve enerjinin verimli kullanılması amacıyla güneşin olmadığı zamanlarda yakıt hücresinden enerji üretilerek konutların ihtiyacı karşılanmıştır. Doğru büyüklükler seçildiğinde, enerjinin hem verimli kullanımı hem de her daim elde edilebileceği ortaya konmuştur. Benzer bir çalışma Swarnakar vd. (2019) tarafından yapılmıştır. Güneş panelleri, yakıt hücresi ve batarya destekli bir sistem oluşturulmuştur. Bu sistemde, öncelikle güneş panelleri yükü beslemiş

ve yetmediği noktada ise yakıt hücresi devreye girmiştir. Her ikisinin de yetersiz kaldığı durumda, batarya devreye girerek yükün beslenmesi sağlanmıştır.

Yakıt hücresinin ihtiyacı olan hidrojenin güneş panellerinin yardımıyla elde edilerek kullanılması amacıyla Shah vd. (2011), konut üzerine kurulan güneş panelleri tarafından beslenen bir elektroliz cihazı ile hidrojen üretimi gerçekleştirmişlerdir. Böylece tam bir hidrojen ile beslenen ev modeli oluşturulmuştur. Fakat, çalışmada bu şekilde devasa bir sistem kurulabilmesi ve işletilebilmesinin maliyeti konusunda ise bir analiz gerçekleştirilmemiştir. Benzer bir çalışmada, Uzunoğlu vd. (2009) tarafından güneş paneli, yakıt hücresi ve ultra kapasitör kullanılarak hibrit bir güç üretimi tasarlanmıştır. Burada güneşten elde edilen enerji DA barasına aktarılmakta ve uygun zamanlarda elektroliz gerçekleştirilmiştir. Yine aynı bara tarafından dolu vaziyette tutulan ultra-kapasitörler de güç ihtiyacının güneş panelleri ve yakıt hücresi tarafından sağlanamadığı anlarda devreye girerek yük talebinin karşılanması amaçlanmıştır.

Panamakidis vd. (2012), mesken yüklerinin beslenebilmesi amacıyla dört farklı hibrit sistemin analizini gerçekleştirmişlerdir. Burada kullanılan hibrit sistemler solar panel-dizel jeneratör, solar panel-rüzgar türbini, rüzgar türbini-dizel jeneratör ve rüzgar türbini-yakıt hücresi sistemleridir. Bütün sistemler kendi içerisinde batarya bloğu da bulundurmaktadır. Bunların ekonomik analizlerine de yer verilen çalışmada rüzgar hızı ve güneş potansiyellerine bağlı olarak bu ikisinden birisi ve bir dizel jeneratör sisteminin birlikte kullanıldığı sistem optimum çözüm olarak sunulmuştur. Fakat hem rüzgar hızı hem de güneş potansiyeli istenilen seviyelerde olmaması durumu burada ortaya konulmamakla birlikte maliyet analizi de yeterli düzeyde detaylandırılmamıştır.

Çalışmaların ekseriyetinde yakıt hücresi tek başına kullanılmamış ve mutlak destekleyici bir enerji kaynağı bulunmuştur. Ayrıca, yakıt hücresinin özellikle kojenerasyon sistemlerinde tercih edildiği gözlemlenmiştir. Çalışmaların hiçbirinde detaylı maliyet analizine yer verilmemiş sadece teknik bakımdan uygulanabilirliği tartışılmış ve örneklerle ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ise, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan bir sistemin etkinliği teknik bakımdan incelenmiş ve bu sistemin detaylı maliyet analizlerine



yer verilmiştir. Böylece, şebeke bağlantısı bulunmayan bir mesken için bu şekilde bir enerji üretimi teknik ve ekonomiklik bakımından irdelenerek sunulmuştur.

Tez çalışması kapsamında kullanılması planlanan yakıt hücresinin birden fazla tipi mevcuttur. Bu konuda hem yakıt olarak kullanılacak olan hidrojen gazı hem de hidrojenden elektrik üretecek olan yakıt hücreleri hakkında detaylı bilgiler alt başlıklar halinde bu kısımda verilmiştir.

## 2.1 Hidrojen

Periyodik cetvelin birinci elementi olan hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve orbitalinde bir elektron bulunmaktadır. Hidrojen evrende en çok bulunan ve çevreye en uygun olan elementtir ve doğada birleşik halinde çok yaygın olarak bulunmaktadır. Örnek vermek gerekirse, su içinde hidrojen, oksijen ile birleşik halindedir ve suyun %11,2'sini hidrojen oluşturmaktadır ve yine hidrojen kömür ve ham petrol içinde karbonla birleşmiş halde bulunmaktadır. Bunun yanında kil ve mineraller genellikle oksijenle birleşmiş halde önemli ölçüde hidrojen içerirler (Şen vd. 2002).

Normal sıcaklık ve basınç altında kokusuz ve renksiz olan hidrojen gazı ( $H_2$ ), oksijenle birleştiğinde yaşam için en önemli madde olan su elde edilmektedir. Hidrojen çok hafif bir gaz olup, karşılaştırmak gerekirse yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u kadardır. Atmosfer basıncında  $-253^{\circ}C$ 'ye soğutulduğunda sıvı hale gelen hidrojenin yoğunluğu ise benzinin 1/10'u kadardır. Hidrojen gazının ısı değeri enerji olarak ifade edilirse metreküp başına yaklaşık 12 milyon joule olarak verilmiştir. Sıvı hidrojenin ısı değeri ise metreküp başına 8.400 milyon joule veya kg başına 120 milyon joule olarak hesaplanmıştır (Aydemir 1998).

Hidrojen enerjisinin avantajlarını maddeler halinde sayılırsa;

- Hidrojen ideal enerji taşıyıcısıdır.
- Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynakları da dahil olmak üzere herhangi bir enerji

kaynağı kullanılarak üretilebilir.

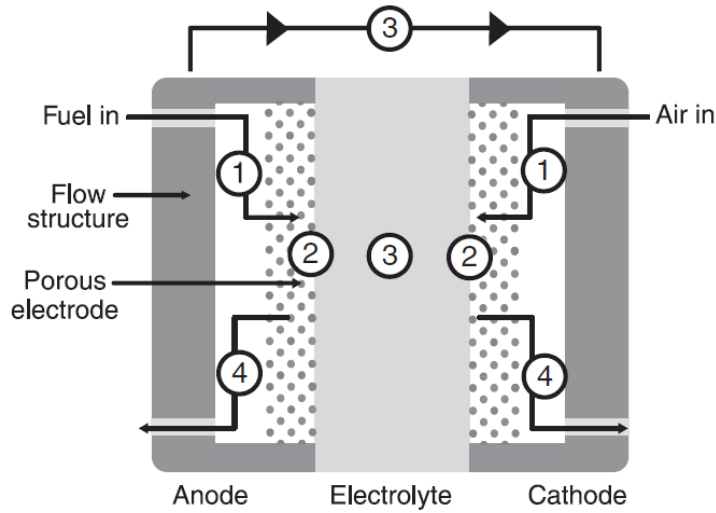
- Hidrojen elektrik kullanılarak üretilebilmenin yanı sıra nispeten yüksek verimle de elektriğe çevrilebilir.
- Hidrojen son kullanımda yüksek verimli enerjiye sahipken bu verim fosil yakıtlardan %39 daha fazladır.
- Hidrojen gaz halinde (büyük ölçekli depolamada), sıvı halinde (hava ve uzay ulaşımında) ve metal hibrit şeklinde (araçlar ve bataryalar vb. depolamada) depolanarak kullanılır. Yani hal değiştirme özelliğine sahiptir.
- Hidrojen boru hatları ve/veya tankerler ile uzun mesafelere taşınabilir.
- Hidrojen diğer yakıtlardan farklı güvenlik ekipmanı ve prosedürü gerektirse de birçok patlayıcı gazlardan daha fazla tehlikeli değildir. Hidrojen güvenlik sıralamasında propan ve metan gazının (doğal gaz) arasındadır. Zehirlilik dikkate alındığında hidrojen en güvenli sayılabilecek yakıttır.
- Hidrojen elektrikten veya güneş enerjisinden üretilirken, taşınırken veya depolanırken ve son kullanımda, herhangi bir kirletici atık üretmez yani çevreye zararlı herhangi bir etkisi yoktur. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilir. Yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden azot oluşabilir. Ancak bu sorun diğer yakıtlarla aynıdır ve kontrol edilebilir düzeydedir.

Hidrojen enerjisinin temel dezavantajları ise;

- Doğada son derece bol olmasına rağmen enerji üretiminde kullanılan hidrojen gazının yüksek saflıkta olması gerekir. Saflaştırma işlemi maliyeti artıran en önemli süreçtir. Yani saf hidrojen üretiminin maliyeti petrol ve doğalgaza göre karşılaştırsak yaklaşık 4 kat daha yüksektir.
- Hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır. Hidrojenin kapladığı hacmin küçültülmesi istenilirse hidrojeni sıvı halde depolamak gerekir. Neredeyse tüm gazlarda uygulanan model uygulanır yani yüksek basınç ve soğutma işlemine gerek vardır. Bu ise depolama maliyetlerini artıracak bir durumdur.

## 2.2 Yakıt Hücreleri

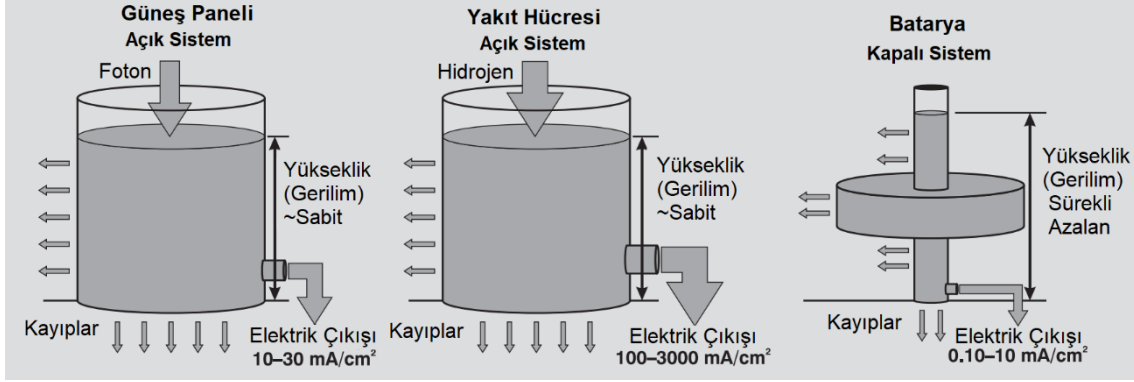
Yakıt hücreleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren fiziksel cihazlardır. Yakıt olarak hidrojen ve oksijen kullanan bu cihazlar, her ikisinin kesintisiz sağlanması şartıyla sürekli elektrik enerji üretirler. Enerjinin üretimi sırasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmektedir. Hidrojen yakıt hücresinin anoduna girer (negatif elektrot). Burada her bir hidrojen atomu, hidrojen iyonu ve 2 elektrona dönüşmektedir. Bu işleme elektrokimyasal dönüşüm denmektedir ve Denklem 2.1’de gösterildiği şekilde gerçekleşmektedir. Protonlar, PEM’den elektrolit yakıt hücresinin katod tarafına doğru geçebilirler fakat elektronlar geçemezler. Bu sebeple, elektron akışı elektriksel devre üzerinden gerçekleşmek zorundadırlar (Şekil 2.1). Sonrasında, protonlar ve elektronlar Katod’da oksijenle buluşur ve su oluştururlar (Denklem 2.2).



**Şekil 2.1** Yakıt hücresinde elektriğin elektrokimyasal olarak üretilmesi aşamalarının gösterildiği kesiti: (1) yakıt ve hava girişleri, (2) elektrokimyasal reaksiyon, (3) iyonik ve elektronik bağlantı, (4) tahliye hatları (O’Hayre 2016).

Yakıt hücrelerinin, bataryalar ve güneş panelleri ile karşılaştırıldığında enerji yoğunluğu çok yüksektir (Şekil 2.2). Bir bataryanın enerji yoğunluğu 0,1 ila 10 mA/cm<sup>2</sup> arasında

iken yakıt hücresindeki enerji yoğunluğu ise 100 ila 3.000 mA/cm<sup>2</sup> arasındadır. Bu değerler bize küçük boyutlu bir yakıt hücresinin daha büyük boyutlu bir batarya bloğu ile aynı enerjiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.2 Yakıt hücresi, batarya ve güneş panellerinin karşılaştırılması (O'Hayre 2016).

Yakıt hücrelerinin bazı avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (O'Hayre 2016);

- Yüksek çalışma verimlerine sahiptirler
- Çeşitli yakıt kaynaklarına sahiptirler
- Çok rahat bir şekilde ölçeklenebilme özelliğine sahiptirler
- Herhangi bir kirliliğe sebebiyet vermezler
- Hareket eden aksamı olmadığından bakım gereksinimi minimumdur
- Yakıt hücrelerine yakıt verildiği müddetçe enerji sağlamaya devam ederler

Bu avantajlara ek olarak dezavantajları da aşağıdaki gibi sıralanabilir (O'Hayre 2016);

- Yakıt hücreleri halihazırda özel malzemelere gereksinim duyduğundan yüksek maliyetlere sahiptirler.
- Yakıt dönüştürme teknolojisi maliyetlidir ve çalışması için fazladan güce ihtiyaç duyar.
- Yakıt hücresi hidrojen dışında başka bir yakıt ile beslenirse, katalizör bozulması ve elektrolit zehirlenmesi nedeniyle performansında zamanla kademeli olarak azalma yaşanır.

Yakıt hücreleri içerisinde kullanılan elektrot türüne göre 5 ana başlıkta sınıflandırılmıştır.

1. Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (PEMFC)
2. Alkali yakıt hücresi (AFC)
3. Fosforik asit yakıt hücresi (PAFC)
4. Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC)
5. Katı oksit yakıt hücresi (SOFC)

### 2.2.1 Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücresi

PEMFC'lerde kullanılan polimer membran ince (20–200  $\mu\text{m}$ ), esnek ve şeffaftır. Her iki tarafta ince bir platin bazlı katalizör ve gözenekli karbon elektrot destek malzeme tabakası ile kaplanmıştır. Bu elektrot–katalizör–membran–katalizör–elektrot sandviç yapısı, membran elektrot düzeneği (MEA) olarak adlandırılır. MEA'nın tamamı 1mm'den daha az kalınlıktadır. PEMFC'nin çalışma sıcaklığı 90°C ile sınırlıdır.

PEMFC şu anda tüm yakıt hücresi türleri arasında en yüksek güç yoğunluğunu (500–2.500  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) sergilemektedir ve aynı zamanda en iyi hızlı başlatma ve açma-kapama çevrim özelliklerine sahiptirler (O'Hayre 2016). Bu nedenlerle, taşınabilir güç ve ulaşım uygulamaları için çok uygundur. Bununla birlikte, PEMFC'nin diğer türlere göre avantajları olduğu gibi kendi içerisinde birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Bu sebeple PEM yakıt pillerini hidrojen enerjili araçlarda ve evlerde tek başına kullanılmaz ancak bir tahrik sistemi ve yardımcı enerji ve güç dönüştürücü birimleri ile kullanılmaktadırlar.

PEMFC'nin uzun ömürlü ve performanslı çalışabilmesi için, o anki güç değeri için gereken hava akış miktarının kararlı bir şekilde sağlanması ve yakıt pili sistemi sıcaklığının uygun değerde tutulması gerekmektedir (Dhaarini vd. 2016). Aynı şekilde yakıt pili anodun da eksik hidrojen gazı bulunması durumu ise yakıt boğulması olarak adlandırılır ve yakıt pilinde kalıcı hasarlara yol açması ile verimin düşmesine ve modülün ömrünün kısılmasına sebep olur (Taniguchi vd. 2004). Bu durumu engellemek için modüllerde birden fazla anod hidrojen gazı beslemesi bulunur (Lohse-Busch 2017).

### **2.2.2 Alkali Yakıt Hücresi**

Alkali yakıt hücrelerinde %40'ı sudan oluşan potasyum hidroksit (KOH) elektrolit olarak kullanılmaktadır. Bu yakıt hücrelerinin verimi %60'lara kadar çıkmaktadır. Fakat en önemli dezavantajı karbondioksit gazının yakıt hücresinin çalışmasını etkilemesidir. Bu sebeple, yakıt hücresinde hem hidrojenin hem de oksijenin saflığı önem kazanmaktadır. Bu yakıt hücreleri etkili bir üretim sürecinde 80.000 saatten fazla kullanılabilirler. Ayrıca KOH yoğunluğuna bağlı olarak 60 ila 250°C'ler arasında çalışmaktadırlar. Bu ve benzeri sınırlamalar nedeniyle, AFC çoğu karasal güç uygulaması için ekonomik olarak uygun değildir. Bununla birlikte, AFC, havacılık endüstrisinde yerleşik bir uygulamaya yol açan etkileyici derecede yüksek verimlilikler ve güç yoğunlukları sergilemektedir. Bu tip yakıt hücreleri ilk üretilen yakıt hücreleridir ve yukarıda sayılan özelliklerinden dolayı 1960'lı yıllarda NASA tarafından uzay araçlarında (Apollo uzay aracı) kullanılan tip olarak da bilinir. NASA bu yakıt hücreleriyle uzay araçlarının ihtiyacı olan elektrik ile suyu karşılamaktadır (O'Hayre 2016).

### **2.2.3 Fosforik Asit Yakıt Hücresi**

Bu yakıt hücresinde elektrolit olarak eriyik fosforik asit kullanılmaktadır. PEMFC'lere göre daha yüksek ısılarda çalışmaktadırlar (180-210°C). Elektrik enerjisi, anoda karbondioksit içeren hidrojen zengini gaz, katoda da hava uygulanarak üretilir. Bu yakıt hücrelerinin verimleri %35-45 arasında değişmektedir. İkinci kuşak olarak da bilinen fosforik asit yakıt hücreleri diğer tip yakıt hücrelerine nazaran daha eski bir geçmişe sahiptirler. Konvansiyonel güç üretim sistemleri için daha uygun karakteristiğe sahiptirler (O'Hayre 2016).

### **2.2.4 Erimiş Karbonat Yakıt Hücresi**

Tipik bir MCFC'deki elektrotlar nikel bazlıdır. Anot genellikle bir nikel/krom alaşımından oluşurken, katot bir lityumlu nikel oksitten oluşur. Her iki elektrotta da nikel,

katalitik aktivite ve iletkenlik sağlar. MCFC'nin nispeten yüksek çalışma sıcaklığı (650°C) yakıt esnekliği sağlar ve ayrıca buhar üreterek de enerji üretimi yapmaya elverişlidir. MCFC yakıt olarak hidrojen, basit hidrokarbonlar (metan ve doğalgaz gibi), kömür gazı gibi saf olmayan gazlar ve basit alkoller ile çalışabilir. Karbon monoksit toleransı, MCFC'ler için bir sorun değildir; CO bir zehir değil, yakıt işlevi görevi görür. Tipik bir MCFC ünitesinin elektrik verimliliği %50'ye yakındır ve bu oran kombine ısı ve güç uygulamalarında %90'a yakın olabilir (O'Hayre 2016).

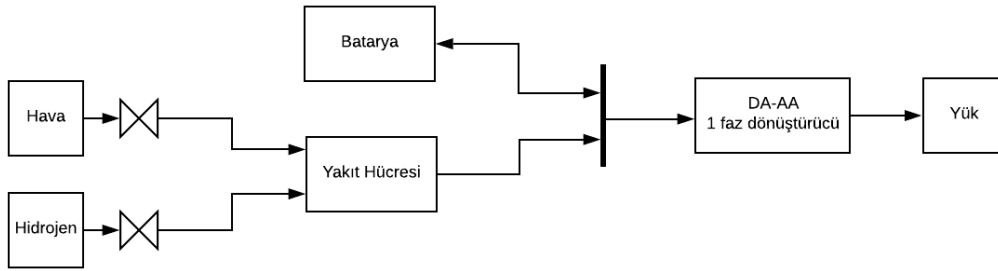
### **2.2.5 Katı Oksit Yakıt Hücresi**

Bu tip yakıt hücresinde anot elektrotu için en yaygın kullanılan malzeme nikel-YSZ sermettir (sermet, seramik ve metal karışımıdır). Burada nikel, iletkenlik ve katalitik aktivite sağlar. YSZ ise termal genleşme uyumluluğu ve mekanik stabilite eklemekle birlikte anot yapısının yüksek gözenekliliğini ve yüzey alanını korur. Katı oksit yakıt hücresinin çalışma sıcaklığı 600 ile 1.000°C arasındadır. Yüksek çalışma sıcaklığı hem zorluklar hem de avantajlar sağlar. Zorluklar yığın donanımı, sızdırmazlık ve hücre ara bağlantı sorunlarını içerir. Yüksek sıcaklık, malzeme gereksinimlerini, mekanik sorunları, güvenilirlik endişelerini ve termal genleşme eşleştirme görevlerini daha zor hale getirir. Avantajları arasında yakıt esnekliği, yüksek verimlilik ve üretilen yüksek kaliteli atık ısı ile kojenerasyon kullanabilme durumu yer alır. SOFC'nin elektriksel verimliliği yaklaşık %50-60 olmakla birlikte kombine ısı ve güç uygulamalarında bu rakamlar %90'a ulaşabilir. Ticari ve endüstriyel uygulamalar için geliştirilmektedirler. Yüksek çalışma sıcaklığı olmasından dolayı metanı kapsamlı yakıt işlemleri gerektirmeden doğrudan kullanma olanağı sağlar (O'Hayre 2016).

### 3. MATERYAL ve METOT

Tez kapsamında bir mesken besleme sistemi teknik bakımdan incelenmekle birlikte ekonomik olarak da incelenerek maliyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, mesken kullanımına en uygun seçenek olan PEM tipi yakıt hücresi kullanılarak hidrojenden üretilen elektrik enerjisinin, uygun dönüştürücüler ile mesken cihazlarının kullanımına sunulması Matlab Simulink ortamında modellenmiştir. Modelleme işlemi sırasında bütün parametreler gerçekte var olan marka ve modeller baz alınarak tasarlanmıştır.

Modellenen bu sistem için enerji kaynağı sadece yakıt hücresine bağlı hidrojen tankından oluşmaktadır. PEM yakıt hücresi, çıkışında düşük DA gerilimi üretmektedir. Bu sebeple, giriş gerilimi 24V nominal olan ve çıkışında 220V AA gerilim verebilen bir invertör modellenmiştir. Böylelikle, üretilen düşük gerilimdeki DA enerjisi 220V AA enerjisine dönüştürülerek yüklere sunulmuştur. Devrenin blok şeması Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen oklar enerjinin akışını sembolize etmektedir. Sadece batarya üzerinde çift yönlü ok bulunmaktadır. Bu bataryanın hem şarj hem de deşarj modlarında çalıştığını belirtmektedir.



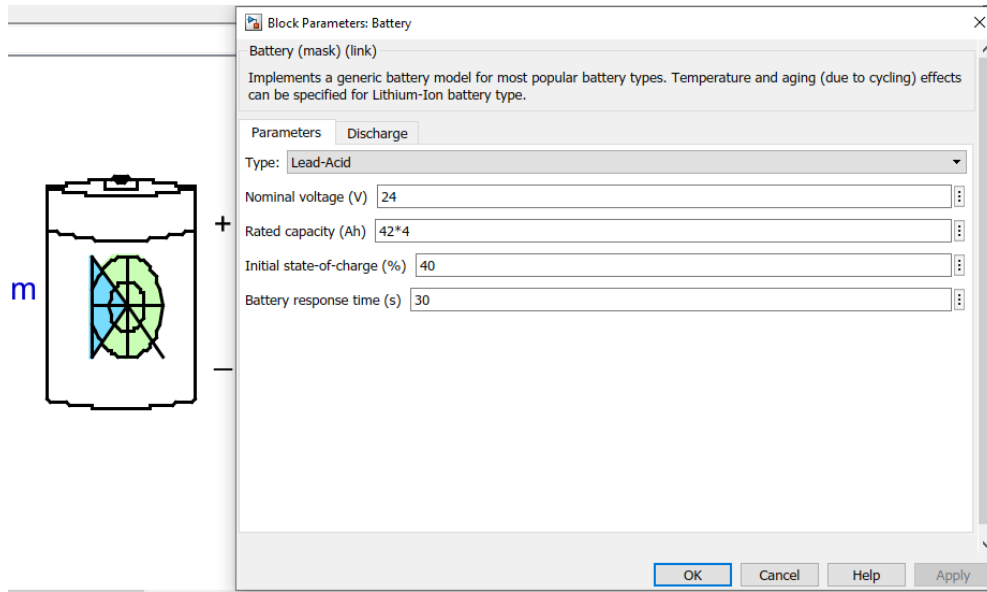
Şekil 3.1 Batarya destekli yakıt hücresi devresinin blok şeması.

#### 3.1 Batarya Bloğu

Sistemde bulunan PEM tipi yakıt hücresinin karakteristiği hakkında daha önceki bölümde bilgiler verilmiş ve bir batarya gibi davrandığı belirtilmişti. Fakat yine de olası acil durumlar ve ani yüklenmelere karşı cevap verebilmek adına sistem üzerinde her biri 12V



42Ah olan sekiz adet kurşun asit bileşime sahip batarya iki seri dört paralel (2x4) olarak bağlanmış ve toplamda 24V 168Ah'lık bir batarya bloğu oluşturulmuştur. Şekil 3.2'de batarya grubunun Simulink ortamında oluşturulan modeli gösterilmektedir. Oluşturulan bu model için Çelik Akü'nün 12V 42Ah'lık bataryaları referans alınmıştır.



Şekil 3.2 Batarya bloğunun Matlab Simulink ortamında gösterimi.

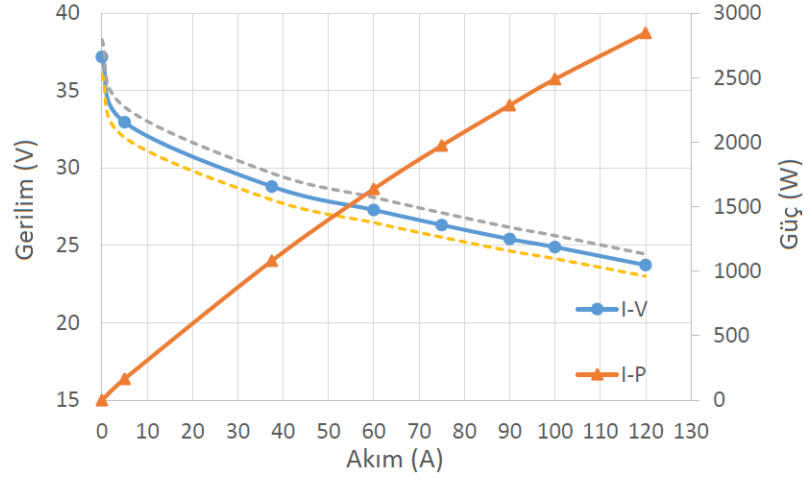
Kurşun asit tipi bataryalar maliyet, dayanım ve kontrol açısından bu tür kullanımlar için uygundur. Ayrıca, kurşun asit bataryaların en önemli dezavantajı ağır olmalarıdır. Bu sebeple, mobil uygulamalarda kullanılması tercih edilmemektedir. Tez kapsamında ise bir mesken üzerine odaklanıldığından tercih edilmiştir. Oluşturulan bu batarya blokları, yakıt hücresinin bağlandığı DA barasına bağlanarak sisteme eklenmiştir.

### 3.2 Yakıt Hücresi Bloğu

Bu projede APFCT firmasının DuraPEM W240 modeli PEM yakıt hücresi (Şekil 3.3) model referansı olarak kullanılmıştır. Bu yakıt hücresinin çalışma koşulları Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Yakıt hücresi 2,4kW nominal güce sahiptir. Akım, gerilim ve güç eğrileri Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Kullanılacak olan bu malzemelerin bütün değerleri Matlab Simulink ortamına aktarılmıştır (Şekil 3.5).



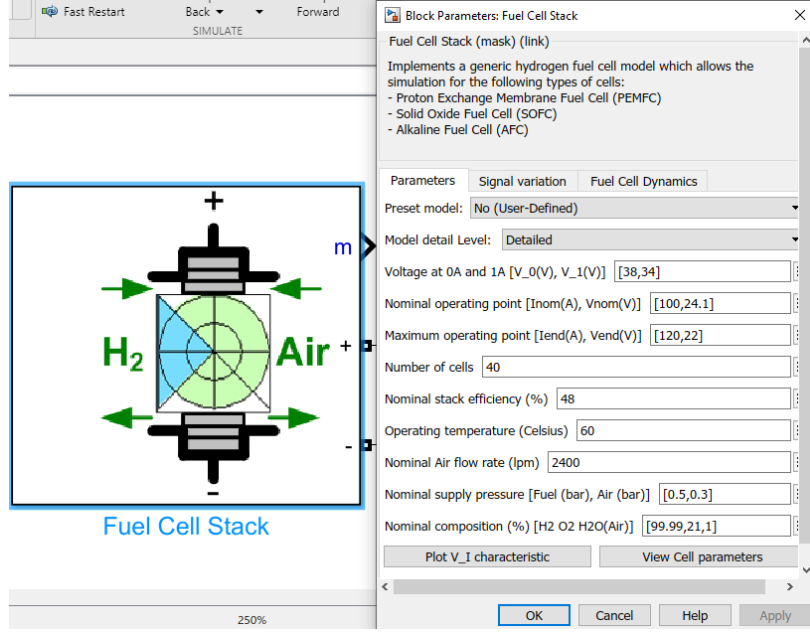
Şekil 3.3 DuraPEM W240 yakıt hücresi.



Şekil 3.4 Yakıt hücresinin Akım, Gerilim ve Güç eğrisi (APFCT 2016).

Çizelge 3.1 DuraPEM W240 çalışma koşulları.

<b>Elektriksel</b>	
Gerilim	0.5-1V/hücre
Akım	0-120A
<b>Yakıt</b>	
Hidrojen	%95 saflık
Giriş basıncı	≤7psi
<b>Oksidant</b>	
Karışım	Ortam havası
Giriş basıncı	≤5psi



Şekil 3.5 Yakıt hücresi bloğunun Matlab Simulink modeli.

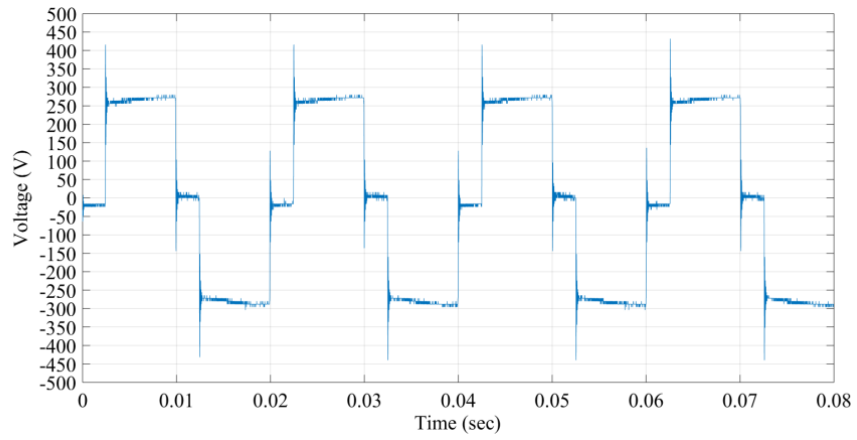
### 3.3 İnvörtör Bloğu

Tez kapsamında, Şekil 3.6'da gösterilen Mervesan marka sabit 3.000W ve pik 12.000W çıkış gücü verebilen bir invertör modellenmiştir. Bu invertörün nominal giriş gerilimi 24V DA şeklindedir. Her ne kadar nominal giriş gerilimi 24V DA olarak verilse de 20-30V DA aralığında giriş gerilimi ile çıkışında 220Vrms AA modifiye sinüs gerilimi oluşturma yeteneğine sahiptir. İnvörtörün çalışmasını detaylandırmak gerekirse, istenilen DA gerilim girişine uygulandıktan sonra bu gerilim, invertörün kendi içinde kullandığı yükseltici tip DA-DA dönüştürücü ile yükseltilmektedir. Yükseltile DA gerilimi, yük üzerinde Şekil 3.7'de gösterildiği haliyle pozitif ve negatif kare dalgalar şeklinde (modifiye sinüs) yük üzerine yansıtılır. Buradaki yansıtma sonucu, şebeke frekansı olan 50Hz'de 220Vrms AA gerilim oluşturmaktadır.

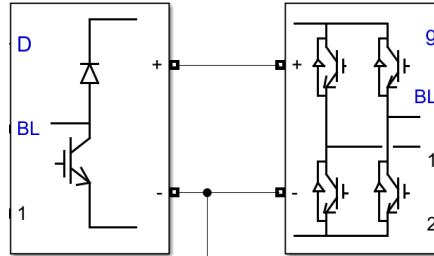
Simulink üzerinde bu invertörün modellenmesi gerçekleştirilmiş ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Burada invertörün iç yapısında olduğu gibi 24V DA gerilimini yükselten yükseltici tip bir DA-DA kıyıcı devresi sonrasında bir invertör devresi modellenmiştir. Ayrıca çıkışında görülen modifiye sinüs dalgası da yine bu modelle elde edilmiştir.



Şekil 3.6 Mervesan 3.000W invertör görüntüsü.



Şekil 3.7 İnvörtör çıkış gerilimi.



Şekil 3.8 DA-DA yükseltici ve DA-AA dönüştürücü invertör bloğunun modeli.

### 3.4 Yük Tespiti

Bu kısımda yüklenme durumlarının analizi için gerçekte bulunabilecek yükler üzerinden hareket edilmiştir. Bu yüklerin ise farklı tip ve güç tüketimine sahip olanlardan olması önemlidir. Yükler için elektrikli süpürge, lamba, bilgisayar şarj aleti, ısıtıcı, ketil ve monitör seçilmiştir. Bu yüklerin nominal güçleri Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.2** Mesken yükleri ve güç tüketimleri.

Mesken yükü	Güç tüketimi [W]
1- Tasarruflu ampül	40
2- Elektrikli süpürge	400
3- Bilgisayar şarj aleti	65
4- Monitor	25
5- Ketil	2.000
6- Isıtıcı	1.000

Yüklerin aynı anda devrede olması durumunda maksimum talep gücünün 3 kW seviyesini aşmaması beklenmektedir ki bu değer invertör için limit değeri ifade eder. Fakat burada sadece invertör limit değeri değil sürekli besleme yapılacak olan batarya destekli yakıt hücresinin de limit değerlerini dikkate almak gerekmektedir. Burada sürekli enerji sağlayıcısı olan yakıt hücresi 2,4kW güç verebilmektedir. Batarya bloğu ise toplamda 4kWh'lik bir enerji limitine sahiptir. Bu durumlar kombine olarak düşünüldüğünde 3kW'lık güç seviyesinin kesinlikle aşılmaması gerekmektedir ki bu durum invertörün arızalanması ile sonuçlanabilecek bir durumdur. Ayrıca 2,4kW'lık yakıt hücresi güç limit değerinin aşılp 3kW'ın altında kalması durumunda ise sınırlı sürede batarya desteği ile güç akışı devam edebilmektedir. Fakat bu durumda, bataryanın dip deşarj olması durumu ve bununla birlikte yakıt hücresinde deformasyonların oluşması riski beraberinde gelecektir. Bu durumlar ile karşılaşılmasını adına oluşturulacak yük kombinasyonlarının 2,4kW seviyesinin altında kalması uygun bulunmuştur. Bu kombinasyonlar ise Çizelge 3.3'deki gibi belirlenmiştir. Tabloda yükler, isimleri yerine Çizelge 3.2'de kullanılan yük numaraları ile belirtilmiştir

**Çizelge 3.3** Yük kombinasyonları ve nominal güç değerleri.

Yük kombinasyonu	Nominal güç [W]
1-3-4	130
1-2-6	1.440
1-3-4-5	2.130

### 3.5 Simülasyon

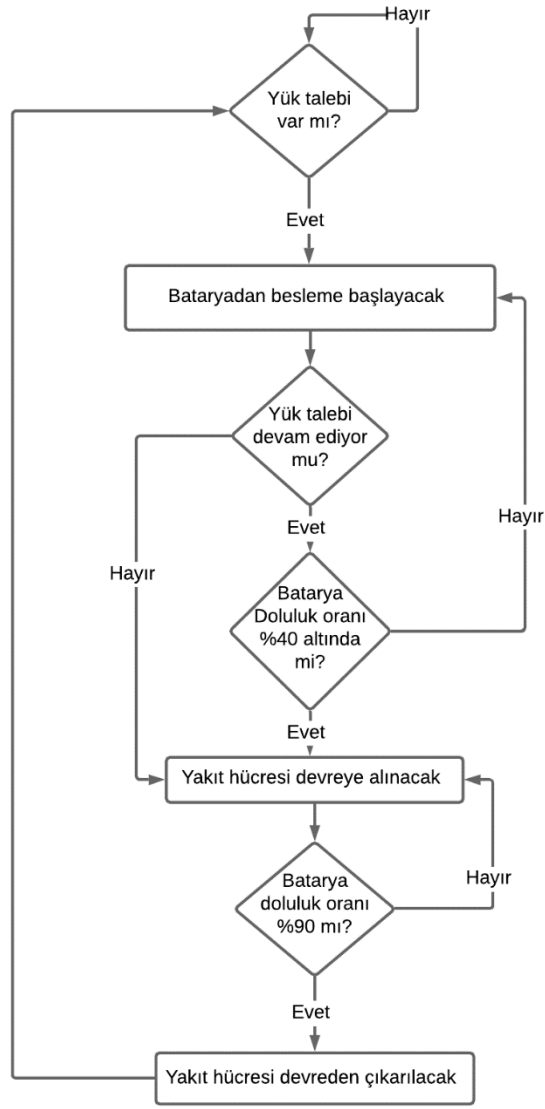
Hazırlanan bloklar simülasyon ortamında birleştirilmiştir. Sonrasında ise farklı tipte yüklerin devreye girmesi ve bu durumlarda oluşacak akım gerilim değişimlerinin not

edilebilmesi için üç farklı yük durumu hazırlanmıştır. Bunlar düşük, orta ve yüksek güç tüketim durumlarını ortaya koyacak şekilde farklı yükler ile oluşturulmuş ve yakıt hücresi akımı, batarya şarj akımı ve invertör giriş akımı ile batarya gerilimleri ölçümlenmiştir. Bunlara ek invertör çıkış gerilimi ve gücü de hesaplanmıştır.

Farklı yük durumlarının hazırlamasındaki asıl amaç farklı yüklenme durumlarında sistem dinamiklerinin gözlemlenmesidir. Tez kapsamında kullanılacak olan yüklerin toplam gücü (hepsinin aynı anda talebi halinde) 3.530W olacaktır ve kullanılan yakıt hücresinin nominal gücü ise 2.400W olarak not edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere, yakıt hücresi tek başına yükleri besleyebilecek kapasitede değildir. Fakat, yük talepleri Çizelge 3.3’de belirtildiği gibi olduğu kabul edilirse yakıt hücresinin çalışması sırasında üretilen enerjinin bir kısmının bataryanın tekrar şarj edilmesi hususunda faydalanılması söz konusu olabilmektedir. Bu sebeple enerji verimliliğini artırmak adına, güç talebi halinde öncelikle bataryadan enerji çekilmesini sağlamak ve sonrasında ise yakıt hücresinin enerji üretmesi sağlanarak hem yükün beslenmesi hem de bataryanın şarj olmasının sağlanması planlanmıştır. Böylece, yakıt hücresini tam kapasite çalıştırarak daha fazla fayda sağlanması amaçlanmış ve fazladan üretilen enerjinin batarya üzerinde depolanarak, daha sonra kullanılması sağlanmıştır. Burada anlatılan durum bir akış diyagramı şeklinde Şekil 3.9’da belirtilmiştir.

### **3.5.1 Düşük Güç Talebi**

Bu kapsamda düşük yük durumu (1W-1.000W) ele alınmıştır. Burada sadece 1-3-4 numaralı yükler ki bunlar dizüstü bilgisayar, monitör ve tasarruflu lambanın kullanıldığı durumu ele alacağız. Burada toplam tüketim ise 130W olarak planlanmıştır. Düşük güç talebi durumunda, invertör giriş bloğu gerilim seviyesi 24-28V aralığında olması beklenmektedir. Bu gerilim aralığında invertör giriş akım aralığı ise 5,4-4,6A olacaktır. Bu akım seviyesini karşılamak için kullanılan 4 paralel batarya kolunun her birinden maksimum 1,35A akım çıkışı olacaktır. 42Ah’lik bataryaların bu akımda çok yavaş deşarj olması beklenmektedir ki bu seviye yaklaşık 0,03C’ler seviyesidir. 0,03C ile deşarj olmasından dolayı yaklaşık 16,5 saat içerisinde batarya %40 SOC seviyesine düşecektir.



Şekil 3.9 Kontrol bloğu akış şeması.

### 3.5.2 Orta Güç Talebi

Burada ise orta güç tüketim durumu (1.000W-2.000W) ele alınmıştır. Bu durum için 1-2-6 yük durumu mevcuttur ve 1.440W tüketim gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu durumda, invertör giriş bloğu gerilim seviyesi 24-28V aralığında olması beklenmektedir. Bu gerilim aralığında invertör giriş akım aralığı ise 60-51A olacaktır. Bu akım seviyesini karşılamak için kullanılan 4 paralel kolun her birinden maksimum 15A akım çıkışı olacaktır. 42Ah'lik bataryaların bu akımda maksimum deşarj olması beklenmektedir ki bu seviye yaklaşık 0,35C seviyesidir. 0,35C ile deşarj olmasından dolayı yaklaşık 1,5 saat

içerisinde batarya %40 SOC seviyesine düşecektir. Orta güç talebi ile besleme durumunda batarya üzerinden sadece 1,5 saatlik güç alınabilir. Kalan güç rezerv olarak saklanacaktır. %40 SOC seviyesi altına inildiğinde ise yakıt hücresi devreye girecek ve hem yükün ihtiyacı olan gücü hem de bataryanın ihtiyacı olan şarj akımını sağlayacaktır.

### **3.5.3 Yüksek Güç Talebi**

Burada, en yüksek güç talebi durumu (2.000W-3.000W) ele alınmıştır. Burada 1-3-4-5 yük durumu mevcuttur ve 2.130W tüketim gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Bu durumda, invertör giriş bloğu gerilim seviyesi 24-28V aralığında olması beklenmektedir. Bu gerilim aralığında invertör giriş akım aralığı ise 90-75A olacaktır. Bu akım seviyesini karşılamak için kullanılan 4 paralel kolun her birinden maksimum 22,5A akım çıkışı olacaktır. 42Ah'lik bataryaların bu akımda maksimum deşarj olması beklenmektedir ki bu seviye yaklaşık 0,5C'ler seviyesidir. 0,5C ile deşarj olmasından dolayı yaklaşık 1 saat içerisinde batarya %40 SOC seviyesine düşecektir. Bu sebepten bu tür bir besleme durumunda batarya üzerinden sadece 1 saatlik güç alınabilir. Kalan güç rezerv olarak saklanacaktır. %40 SOC altına inildiğinde ise yakıt hücresi devreye girecek ve hem yükün ihtiyacı olan gücü hem de bataryanın ihtiyacı olan şarj akımını sağlayacaktır.



## 4. BULGULAR

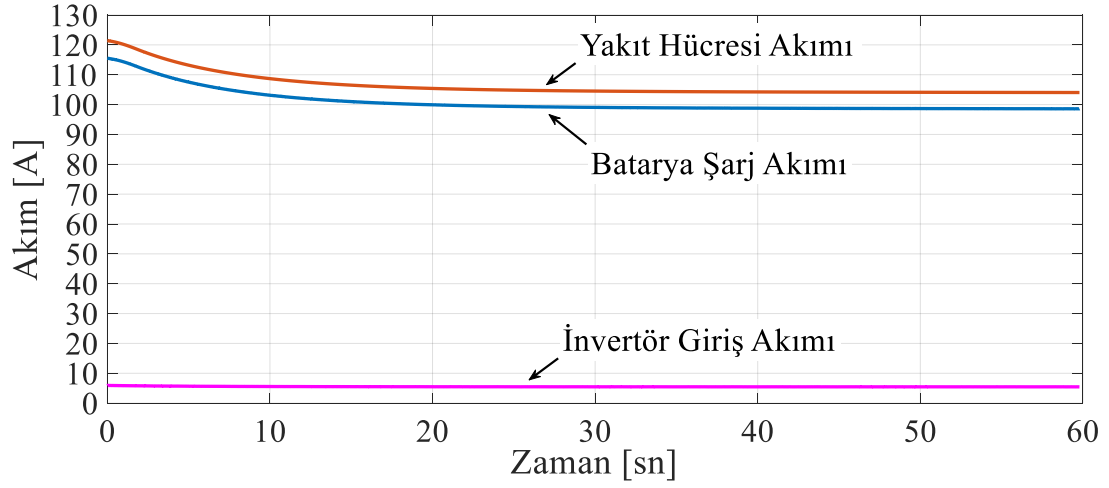
Tez kapsamında daha önce tarif edilen farklı yük durumları altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonların sonuçları aşağıda ayrı ayrı verilmiştir. Simülasyonlarda, öncelikle batarya şarj durumu %40 olduğu duruma kadar sistem batarya üzerinden beslenmiştir. %40 seviyesine gerilediğinde artık yakıt hücresi devreye girmiştir. Bu durumların hepsinde yakıt hücresi hem batarya bloğunu şarj etmekte hem de yük için gerekli olan akımı invertöre sağlamaktadır. Sonrasında ise, şarj durumu %90 olduğu durumların simülasyon sonuçları sunulmuştur. Burada simülasyonların çok uzun zamanlar alması sebebiyle sadece yakıt hücresinin devreye girmesinden ve çıkmasından sonraki 60 saniyelik zaman zarfı gösterilmiştir.

Bu kısımda her bir durum kapsamında batarya, yakıt hücresi ve invertör çıkış akımları ile batarya gerilimi grafiksel olarak sunulmuştur. Bunlara ek olarak bataryaların SOC değişimleri belirtilmiştir. En son olarak, oluşan maliyetlerin de güncel değerler üzerinden hesap edilerek karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

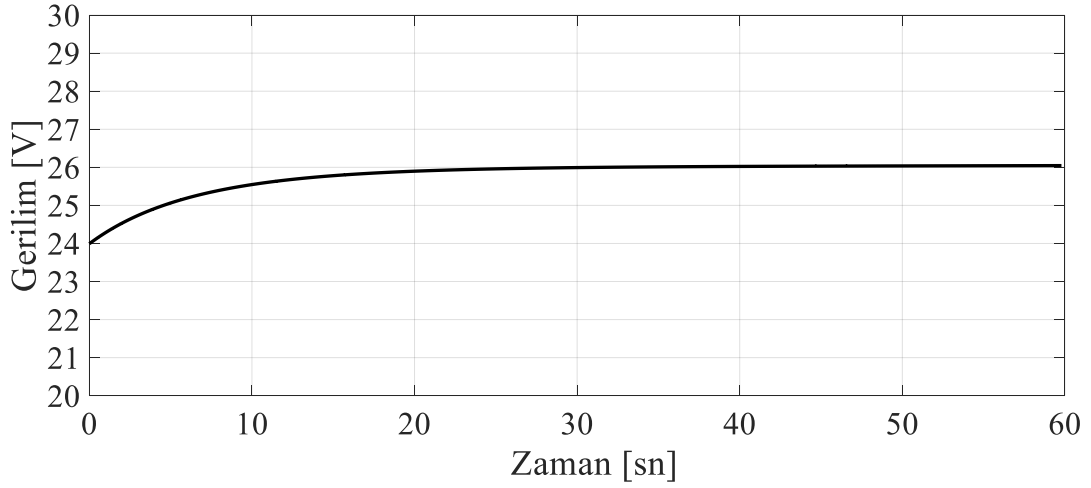
### 4.1 Düşük Güç Talebi Durumu

Tasarruflu ampül, bilgisayar ve monitör yük durumu için simülasyonlar bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de yakıt hücresi akımı, batarya şarj akımı ve invertör giriş akımının 60 saniyelik simülasyon sonucu gösterilmiştir. Batarya bloğu buraya kadar deşarj modunda iken yakıt hücresi devreye girdikten sonra şarj moduna geçmiş ve ortalama şarj akımı 100A olmuştur.

Şekil 4.2’de ise batarya bloğunun gerilim grafiği sunulmuştur. Burada 24V seviyelerinden 26V seviyesine kadar hızlı bir artış gözlenmektedir. Sonrasında ise artış hızı çok yavaşlamaktadır. Buna ek olarak batarya SOC durumu ise 60 saniye sonunda %40 seviyesinden %41 seviyesine lineer bir artış göstermiştir.

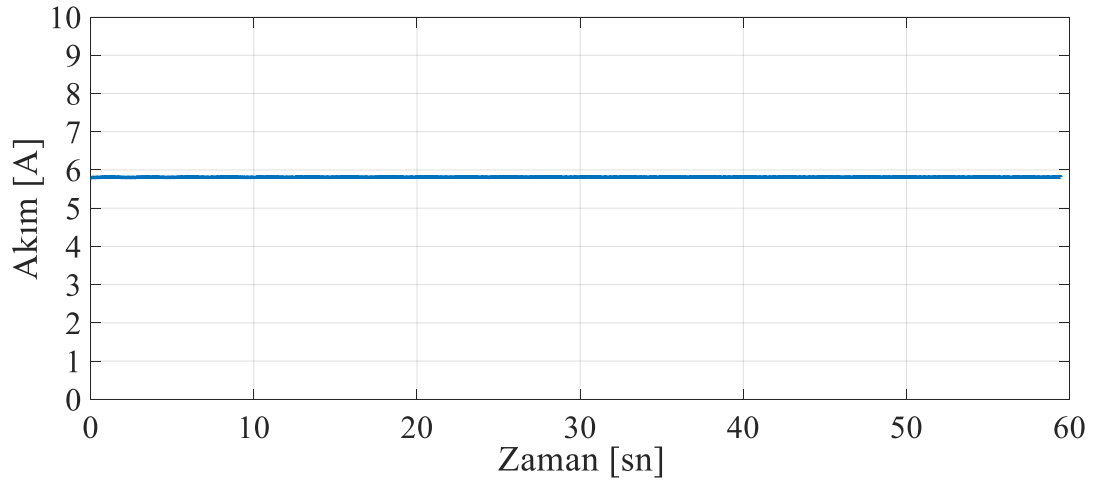


**Şekil 4.1** Düşük güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan akım grafikleri.

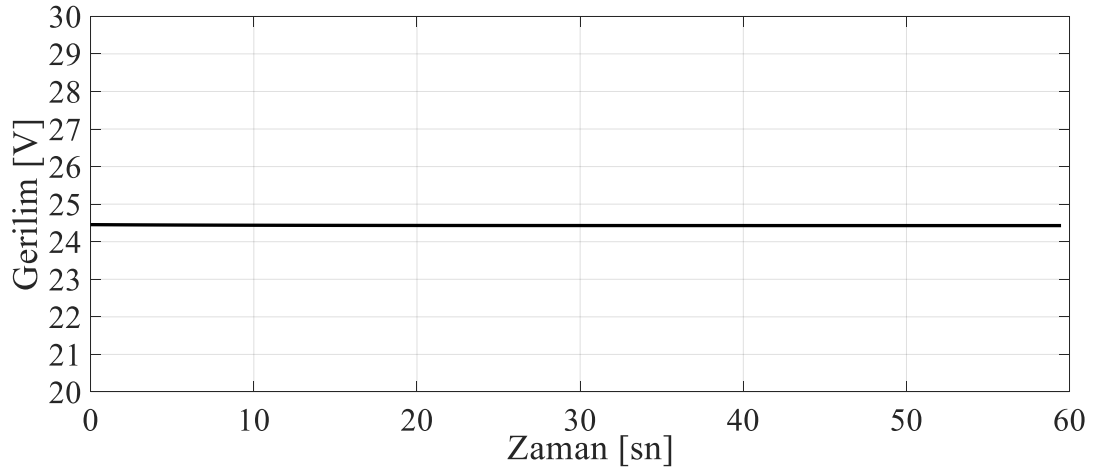


**Şekil 4.2** Düşük güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi.

Batarya şarj durumu %90 seviyesine ulaştığında, belirtilen yük durumları için yakıt hücresi devreden çıkmış ve artık yükler batarya tarafından beslenmeye başlamış olacaktır. Bu durumda batarya bloğundan gelen toplam akım Şekil 4.3Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu akım aynı zamanda invertör giriş akımıdır. Batarya bloğu tarafından 60 saniye boyunca beslenen ve toplam 6A akım sağlandığında %90 SOC seviyesinden %89,94 SOC değerine bir düşüş olmuştur. Bu sırada yük altında batarya gerilimi 24,43V seviyelerinde olduğu Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



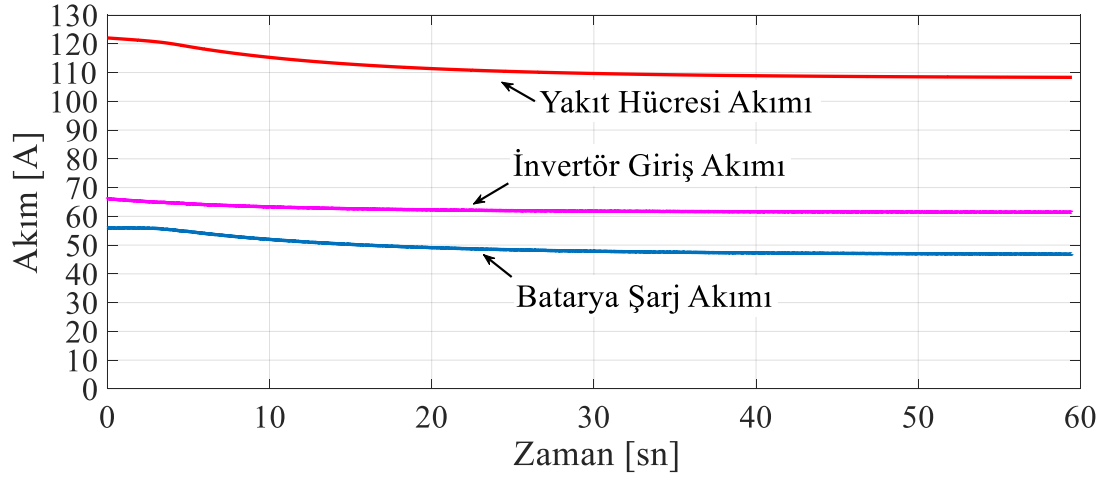
**Şekil 4.3** Düşük güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim.



**Şekil 4.4** Düşük güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.

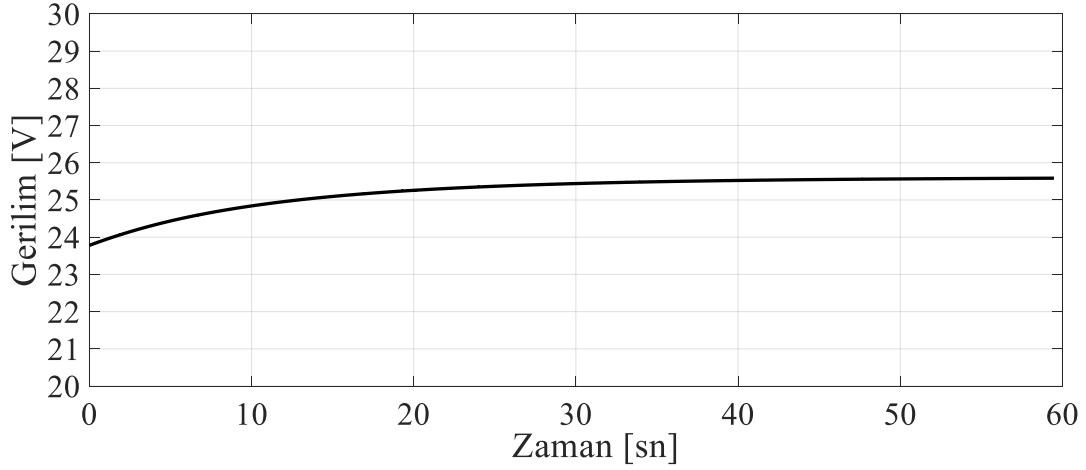
## 4.2 Orta Güç Talebi Durumu

Tasarruflu ampül, süpürge ve ısıtıcı durumunun simülasyonu bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5’de yakıt hücresi, batarya şarj ve invertör giriş akımlarının 60 saniyelik simülasyon sonucu gösterilmiştir. Batarya bloğu buraya kadar deşarj modunda çalışırken yakıt hücresi devreye girdikten sonra şarj moduna geçmiş ve ortalama şarj akımı 47A olmuştur.



Şekil 4.5 Orta güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan akım grafikleri.

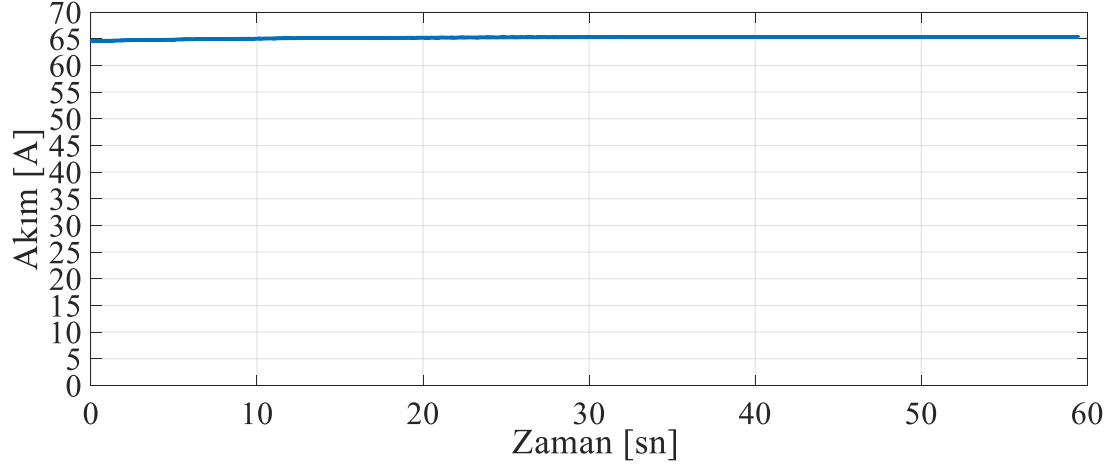
Şekil 4.6'da ise batarya bloğunun gerilim grafiği gözlenmiştir. Burada 24V seviyelerinden 25V seviyesine kadar hızlı bir artış gözlenmektedir. Sonrasında ise artış çok yavaşlamaktadır. Buna ek olarak batarya SOC durumu ise 60 saniye sonunda %40 seviyesinden %40,45 seviyesine lineer bir artış göstermiştir.



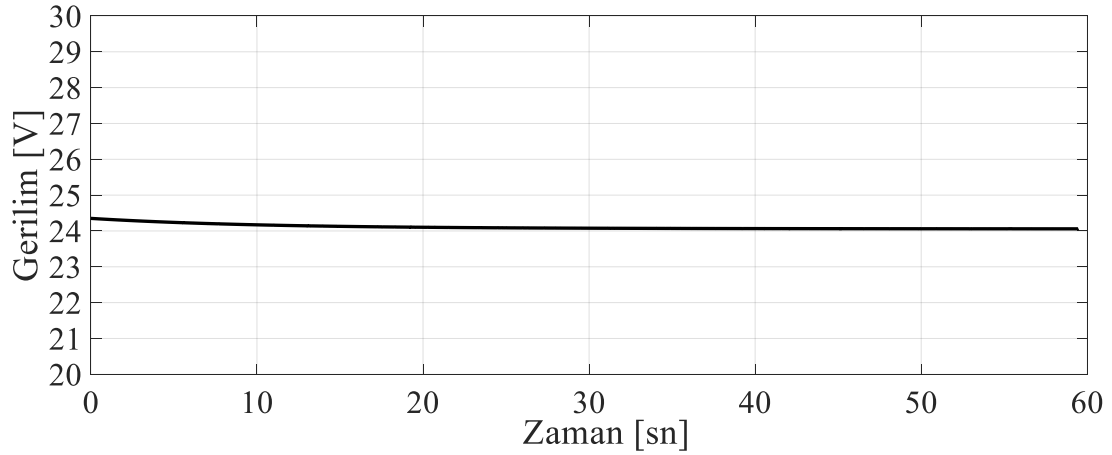
Şekil 4.6 Orta güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi.

Batarya şarj durumu %90 seviyesine ulaştığında, belirtilen yük durumları için yakıt hücresi devreden çıkmış ve artık yükler batarya tarafından beslenmeye başlamış olacaktır. Bu durumda batarya bloğundan gelen toplam akım Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Bu akım aynı zamanda invertör giriş akımıdır. Batarya bloğu tarafından 60 saniye boyunca beslenen ve toplam 65A akım sağlandığında %90 SOC değerinden %89,36 SOC değerine

bir düşüş olmuştur. Bu sırada yük altında batarya gerilimi 24,15V seviyelerinde olduğu Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Orta güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim.

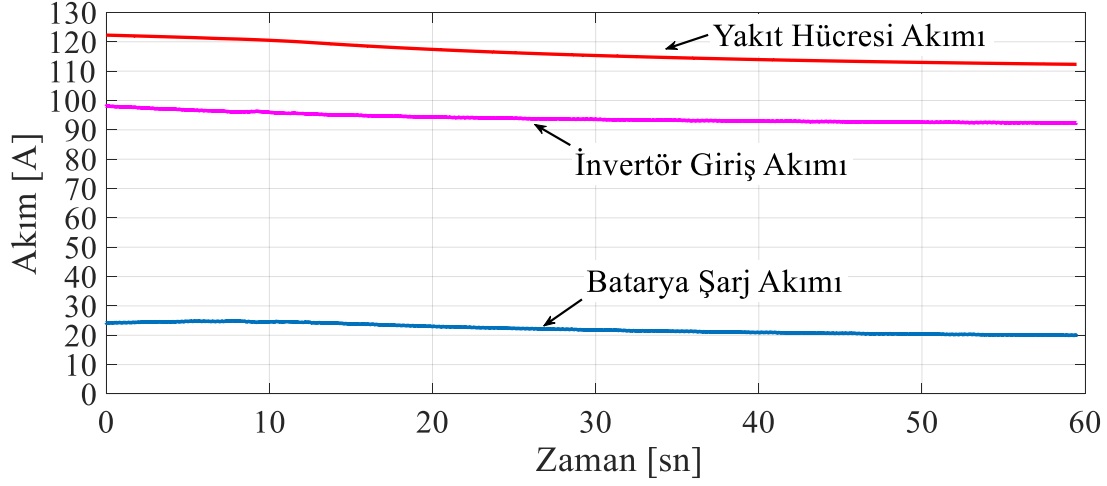


Şekil 4.8 Orta güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.

### 4.3 Yüksek Güç Talebi Durumu

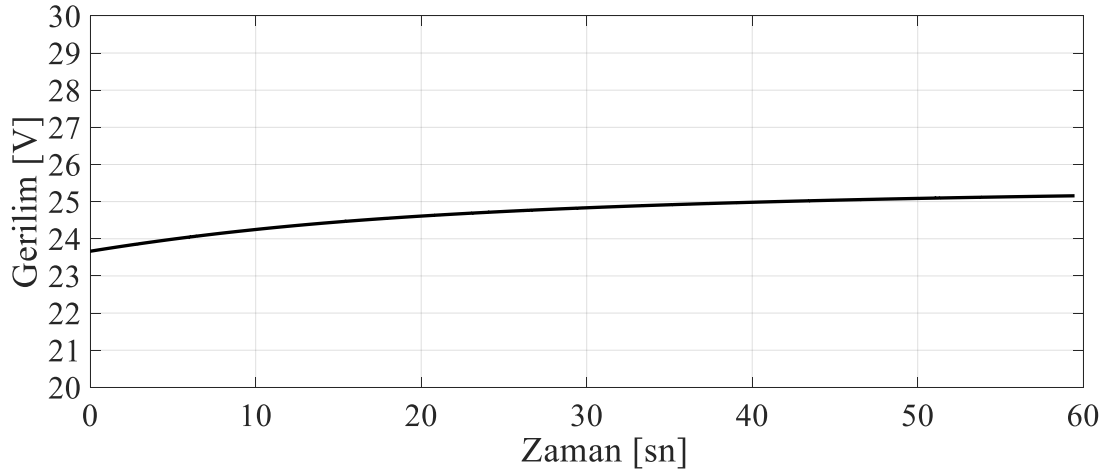
Tasarruflu ampül, bilgisayar, monitör ve ketıl durumunun simülasyonu bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9’da yakıt hücresi, batarya şarj ve invertör giriş akımlarının 60 saniyelik simülasyon sonucu gösterilmiştir. Batarya bloğu buraya kadar deşarj modunda çalışırken yakıt hücresi devreye girdikten sonra şarj moduna geçmiş ve

ortalama şarj akımı 20A olmuştur. Burada her bir paralel batarya koluna 5A'lık bir şarj akımını girmektedir.



Şekil 4.9 Yüksek güç talebi durumunda yakıt hücresi devrede iken oluşan akım grafikleri.

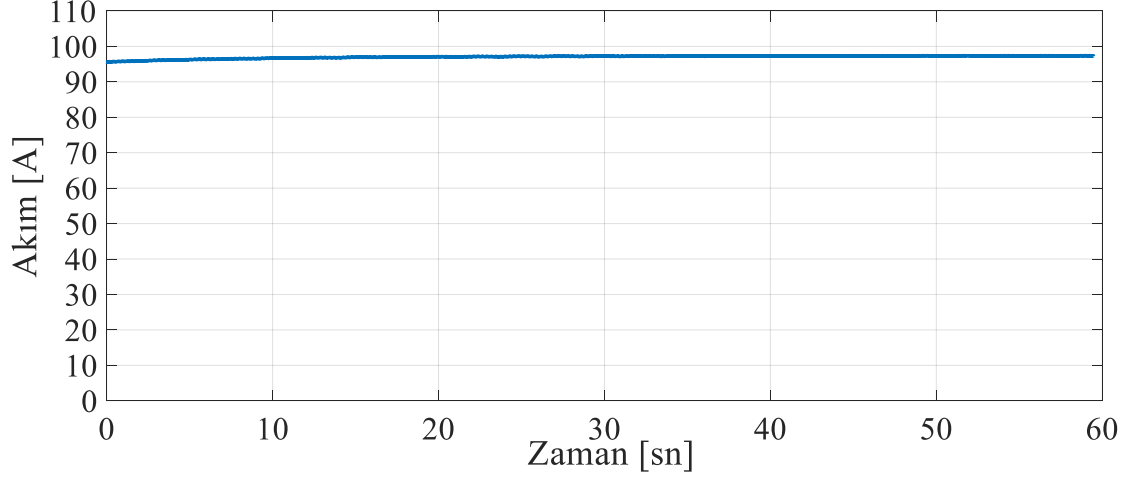
Şekil 4.10'da ise batarya bloğunun gerilim grafiği gözlenmiştir. Burada 24V seviyelerinden 25V seviyesine kadar daha yavaş bir artış gözlenmektedir. Sonrasında ise artış çok yavaşlamaktadır. Buna ek olarak batarya SOC durumu ise 60 saniye sonunda %40 seviyesinden %40,21 seviyesine lineer bir artış göstermiştir.



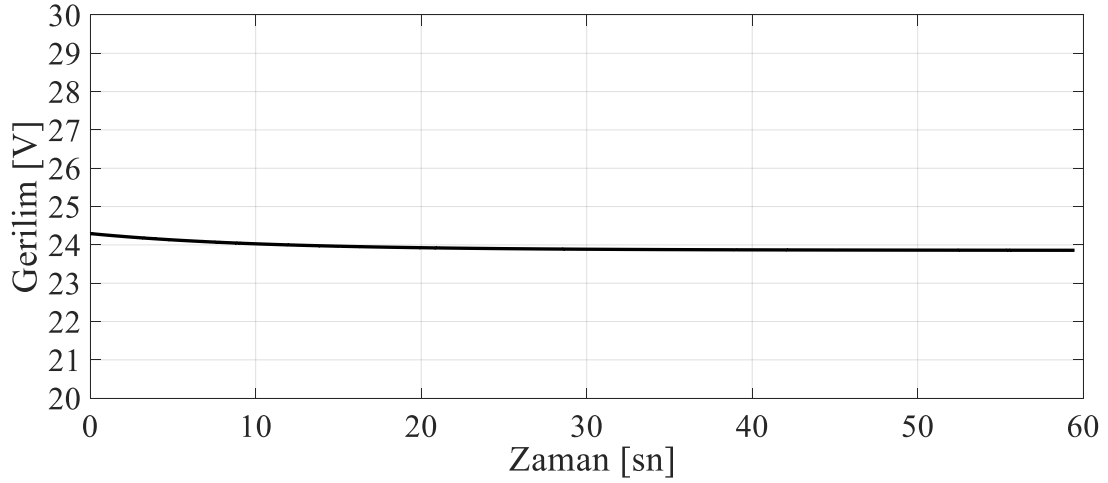
Şekil 4.10 Yüksek güç talebi durumunda yakıt hücresi devredeyken oluşan batarya gerilimi.

Batarya şarj durumu %90 seviyesine ulaştığında, belirtilen yük durumları için yakıt hücresi devreden çıkmış ve artık yükler batarya tarafından beslenmeye başlamış olacaktır.

Bu durumda batarya bloğundan gelen toplam akım Şekil 4.11’da gösterilmiştir. Bu akım aynı zamanda invertör giriş akımıdır. Batarya bloğu tarafından 60 saniye boyunca beslenen ve toplam 97A akım sağlandığında %90 SOC değerinden %89,06 SOC değerine bir düşüş olmuştur. Bu sırada yük altında batarya gerilimi 23,99V seviyelerinde olduğu Şekil 4.12’da gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Yüksek güç talebi durumunda çıkış akımındaki değişim.



Şekil 4.12 Yüksek güç talebi durumunda çıkış gerilimindeki değişim.

#### 4.4 Maliyet Analizi

Bu tür enerji sistemlerinde belirleyicilik unsurlarından bir tanesi maliyet kalemidir. Literatür taramasında da ifade edildiği üzere, çalışmalarda maliyet kaleminden ziyade bu

tür sistemlerin uygulanması araştırılmıştır. Bu tez kapsamında hem uygulama kısmı incelenmiş hem de maliyet konusunda analizler yapılmıştır. Maliyet analizleri, ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri şeklinde üç ayrı başlık altında incelenmiştir. İlk yatırım maliyetleri, yatırımın çalışmaya başlamadan önce ortaya çıkan miktarları içermektedir. Bu miktarların tek başına incelenmesi sistemin genel maliyetinin anlaşılmasında yanlışlıklara sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple, işletme sırasında oluşacak miktarların belirli bir referans değere göre hesaplanması ile bu sistemin uzun yıllar çalıştırılması ile karşılaşılabilecek maliyetler anlaşılabilir olacaktır. Sadece bu ikisi de tam anlamıyla mali durumu anlamlı hale getirmemektedir çünkü burada çalışan bir sistem var ve bu sistemin periyodik bakım gerektiren parçaları bulunmaktadır. Bu sebeple bakım masrafları da ayrı bir başlık altında incelenmiş ve sunulmuştur.

#### **4.4.1 İlk Yatırım Maliyeti**

Enerji sistemlerinde genel anlamda ilk yatırım maliyetleri yüksek miktarlarda karşımıza çıkmaktadır. Bunun asıl sebebi bir enerji üretim istasyonu kurulmasıdır. Kurulan bu sistemlerin büyüklüklerine ve tiplerine göre farklı maliyetler söz konusudur. Burada kullanılması planlanan yakıt hücresi ise yeni bir teknoloji olmasından dolayı hali hazırda geliştirilmeye ve maliyetlerinin düşürülmesine çalışılmaktadır. Burada bahsedilen fiyatlar bu tez çalışması yapıldığı sırada elde edilen fiyatlardır ki zamanla daha büyük güçler için daha küçük fiyatlara gelmesi de beklenmektedir.

Simülasyon ile analizi yapılan sistemin ilk yatırım maliyeti ile ilgili analizler bu kısımda verilecektir. Yakıt hücre beslemesi durumunda kullanılacak malzeme listesi ve bunlara ilişkin maliyetler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Burada gösterilen değerler sistemin ilk kurulumu için gerekli olacak olan yaklaşık maliyeti göstermektedir. Buradan da görüldüğü üzere bu tür bir enerji sistemi kurulum maliyetinin %84’lük kısmını yakıt hücresi oluşturmaktadır. Bir sonraki büyük kalem ise %7’lik bir etki ile invertör oluşturmuş ve bunu bataryalar takip etmiştir.



**Çizelge 4.1** Sistemde kullanılan malzemeler ve maliyetleri.

Malzeme	Miktar	Maliyet (₺)
PEM yakıt hücresi	1 Adet	60.000
3000W invertör	1 Adet	5.000
12V 42Ah batarya	8 Adet	3.200
Hidrojen tüpü	1 Adet	2.000
Kullanılan ara malzemeler ve bağlantı ekipmanları	1 Set	1.000
<b>Toplam</b>		<b>71.200</b>

#### 4.4.2 İşletme Maliyetleri

İşletme maliyetlerinde asıl dikkate alınacak kısımlar sarf malzemelerdir. Burada kullanılan sarf malzemesi ise hidrojen gazıdır. Bunun dışında kullanılabilen bir sarf malzeme yoktur. Bu sebeple, işletme maliyetlerinin doğru anlaşılabilmesi için 1 kWh enerji üretimi için gerekli olacak gaz maliyetinin bulunması gerekmektedir. Bunun için ise yakıt hücresine hidrojen sağlayan tankın 0,35 bar seviyesinde kaç saat hidrojen gaz çıkışı verebileceğini hesaplamak gereklidir.

Gerçek bir sistemde yakıt olarak kullanılacak hidrojen gazı, sanayi tipi bir tüp içerisinde bulunmaktadır. Burada kullanılan tüp 50 L hidrojen gazı içermektedir ve bu gazın hacmi 8,88m<sup>3</sup>'tür. Toplam basıncı 250 bar'dır. Yakıt hücresi kullanımı sırasında tüketilen hidrojen gazı basıncı 5 psi-0,35 bar olması gerekmektedir. Bu ayarlanan basınç seviyesinde tüpün tam boşalabilmesi için geçmesi gereken zaman Denklem 4.1 ve 4.2 yardımıyla hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle tüp çıkışındaki gazın debisi Weymouth Formülü (Denklem 3.1) ile hesaplanmıştır (Weymouth 1912).

$$Q = 2,61 * 10^{-8} * D^{2,667} * \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{S * L} * \frac{288}{T}} \quad (4.1)$$

Bu denklemde,  $Q$  debi(m<sup>3</sup>/saat),  $D$  boru iç çapı (mm),  $L$  boru boyu (km),  $P_1$  ve  $P_2$  sırasıyla giriş ve çıkış basınç (Pa),  $S$  hidrojen gaz yoğunluğu (kg/Nm<sup>3</sup>) ve  $T$  sıcaklık (°K) olarak verilmiştir. Boru iç çapı 6 mm, boru boyu 0,002 km, giriş gaz basıncı 35.000 Pa, çıkış gaz

basıncı 0 Pa, hidrojen gaz yoğunluğu 0,089 kg/Nm<sup>3</sup> ve sıcaklık 20°K olarak girildiğinde  $Q = 8.074 \text{ m}^3/\text{saat}$  hesaplanmıştır.

$$P_{tüp} * V_{tüp} = P_{hava} * V_{hava} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de tüp içindeki 250 bar altındaki gazın, normal ortam basıncındaki hacmi hesaplanmıştır. Burada  $P_{tüp}$  250 bar,  $V_{tüp}$  8,88 m<sup>3</sup> ve  $P_{hava}$  1,01325 bar olarak verilmiştir. Buradan da tüp içindeki hidrojen gazının açık havada 2.191m<sup>3</sup> hacim kapladığı hesaplanmıştır. Sonuç olarak bir hidrojen tüpünün boşalması için geçmesi gereken 271,3 saat olacaktır. Yakıt hücresi sisteminin bir saatlik çalışmasının işletme maliyeti hesabı Denklem 4.3’te gösterilmiştir.

$$M_h = \frac{P_{tank}}{271,3} [\text{₺}/h] \quad (4.3)$$

Bu denklemde  $M_h$  saatlik işletme maliyetini ve  $P_{tank}$  ise hidrojen tankının dolum ücretini ifade etmektedir. Bir hidrojen tankının dolum ücreti 500₺’dir (Kasım-2021). Bu bilgilerden yola çıkarak, yakıt hücresinin çalışması sırasında tükettiği hidrojen gazının maliyeti 1.843 ₺/h olarak hesaplanmıştır.

Hidrojen gazının birim maliyeti hesaplandıktan sonra oluşturulan yük durumlarının işletme maliyetleri hesap edilmesi gereklidir. Bu hesap yapılırken her bir durum için talep faktörünün 0,5 olarak varsayılmıştır. Yani, yükler günün 12 saati çalışmış ve diğer 12 saati çalıştırılmamış olarak varsayılmıştır. Bu durumda öncelikle, düşük güç talebi durumu kapsamında 130W’lık güç tüketimi mevcuttur ve toplam enerji tüketimi Denklem 4.4’ten yararlanılarak hesap edilir.

$$E = P * h \quad (4.4)$$

Bu denklemde  $E$  enerjiyi kWh cinsinden,  $P$  tüketim gücünü kW cinsinden ve  $h$  ise tüketimi saat cinsinden ifade eder. Buradan hesaplanan enerji miktarı 46,8 kWh'tir. Bu enerji tüketimi batarya ve yakıt hücresinin oluşturduğu hibrit sistem tarafından sağlanmıştır. Yakıt hücresinin tam kapasite çalıştığı varsayılırsa, bu hesaplanan enerjiyi sağlayabilmesi için toplam çalışma süresi ve toplam işletme maliyeti sırasıyla Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_{\zeta s} = \frac{E}{P_{FC}} \quad (4.5)$$

$$T_{im} = T_{\zeta s} * M_h \quad (4.6)$$

Burada  $T_{\zeta s}$  toplam çalışma süresini saat olarak,  $T_{im}$  toplam işletme maliyetini ₺/h olarak,  $P_{FC}$  ise yakıt hücresinin nominal gücünü kW olarak ifade etmektedir. Verilenler yerine yerleştirildiğinde  $T_{\zeta s} = 19,5$  saat ve  $T_{im} = 35,94$  ₺/h bulunur.

Orta güç talebi durumu kapsamında 1.330W'lık güç tüketimi mevcut ve toplam enerji tüketimi Denklem 4.4'ten 478,8 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplanan enerjiyi sağlayabilmesi için toplam çalışma süresi ve toplam işletme maliyeti sırasıyla Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak 199,5 ve 367,67 ₺/h bulunmuştur.

Yüksek güç talebi durumu kapsamında 2.130W'lık güç tüketimi mevcut ve toplam enerji tüketimi Denklem 4.4'ten 766,8 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplanan enerjiyi sağlayabilmesi için toplam çalışma süresi ve toplam işletme maliyeti sırasıyla Denklem 4.5 ve 4.6 kullanılarak 319,5 ve 588,83 ₺/h hesaplanmıştır. Bu hesaplanan değerler Çizelge 4.2'de bir tablo halinde verilmiştir.

**Çizelge 4.2** Farklı güç talep durumları kapsamında aylık toplam enerji tüketimi, çalışma süresi ve işletme maliyetleri.

	Aylık Toplam Enerji Tüketimi [kWh]	Aylık Toplam Çalışma Süresi [saat]	Aylık Toplam İşletme Maliyeti [₺]
Düşük güç talebi	46,8	19,5	35,94
Orta güç talebi	478,8	199,5	367,67
Yüksek güç talebi	766,8	319,5	588,83

#### 4.4.3 Bakım Giderleri

Bakım giderleri ilk anda ortaya çıkmayan ve bir zaman sonra karşılaşılan maliyetlerdir. Bunların farklı zaman ve şartlar altında çıkmalarından dolayı genellikle yaşam döngüleri üzerinden hesap edilirler.

Hidrojen yakıt hücresinde kullanılan membranlar, kullanım kılavuzunda tavsiye edilen belirli bir süre sonra yaşam döngülerini kaybetmektedirler. Bu süre DuraPemW240 modeli yakıt hücresi için 3.500 saat olarak bildirilmiştir. Bu çalışma saati sonrasında bunların yenilenmesi gerekmektedir. Yenilenmesi için 20x15 cm uzunluklara sahip Anion Exchange Membran (AEM) kullanılması gerekmektedir ve bu membranlardan 40 adet lazımdır. Her birinin fiyatı 38\$ ve toplamda ise 1.520\$ ki yaklaşık 16.000₺ bir maliyet oluşturmaktadır. Bu maliyetin yakıt hücresi her çalışmasında ful kapasite çalıştırıldığı baz alınarak hesaplanan birim enerji başına düşen miktarı ise 1,9₺ olacaktır.

Kurşun asit tipi bataryalar bakım gerektirmeyen tip olduklarından, bu bataryalar için bir bakım bedeli belirlenmemiştir. Ayrıca kullanılan invertör ise aşırı akım zorlamalarına maruz kalmadığı müddetçe bakım gerektirmemektedir. İçerisinde arıza durumlarında kendini koruması için sigortalar bulunmaktadır. Böyle bir arıza durumunda bu sigortaların değişmesi gerekebilir. Bunların maliyeti ise çok düşük olduğundan bakım maliyetleri içerisinde değerlendirilmemiştir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez kapsamında yakıt hücresi ile beslenen bir mesken için kullanılması düşünülen yükler ve enerji kaynağının, etkinliği ve uygulanabilirliğinin araştırılması için bilgisayar ortamında simülasyonları yapılmış ve sonrasında ise maliyetleri gerçek değerler üzerinden hesap edilmiştir. Bu simülasyonlar göstermiştir ki, 2,13kW'lık (yüksek güç talebi durumu) tüketime sahip bir mesken, batarya destekli yakıt hücresi ve invertör sistemi ile beslenebilmektedir.

Tez çalışmasında uygulanan algoritma ile öncelikle batarya üzerinden sistemin beslenmesi sonrasında ise tam kapasite çalıştırılan yakıt hücresinin devreye girmesi sağlanmaktadır. Bu durumda yakıt hücresi tarafından üretilebilecek gücün tamamı kullanılabilmiştir. Aksi takdirde, yakıt hücresinden bakıma girmeden önce elde edilebilen toplam enerji düşmüş olacaktır ki bu da üretilen enerji başına harcanan maliyet üzerinde ve doğal olarak genel maliyetlerde artışa sebebiyet verecektir. Fakat bu besleme durumu limit değerlere yakın olduğundan çok fazla ısı ortaya çıkmasına sebep olacaktır. Sonuç olarak soğutma sistemleri de devreye girerek yakıt hücresi ve invertörün soğutulması gerekmektedir.

Maliyet açısından daha önce bilinen kaynaklar içerisinde detaylı bir değerlendirilmeye rastlanılmamıştır. Bu sebeple bu tez kapsamında maliyetin değerlendirilmesi için, ilk yatırım, işletme ve bakım maliyetleri olmak üzere üç farklı kategoriye ayrılarak analizler yapılmıştır. Bu tür bir sistemin ilk yatırım maliyeti 71.200₺ olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak işletme maliyetleri ise kWh başına 0,768₺ olarak belirlenmiştir. Son olarak bakım maliyetleri hesap edilmiştir. Fakat, bakım maliyetlerinde belirleyici olacak olan en önemli kriter yakıt hücresinin yaşam döngüsüdür. Yakıt hücresi kullanım şartlarına göre değişkenlik gösteren bir yaşam döngüsüne sahiptir. Burada katalog değerlerinde belirtilen yaşam döngüsü baz alındığında, her 3500 saatlik çalışma sonrasında 16.000₺ bakım masrafı olacaktır ki kWh başına 1,9₺ ek bir masraf demektir.

Günümüz elektrik maliyetleri düşünülerek yapılan hesaplama sonunda;

- Düşük güç talebi için aylık 46,8kWh'lik bir tüketim için 35,94₺ işletme maliyeti ve 88,92₺ bakım maliyeti oluşacaktır. Bu durumda toplam maliyet 124,86₺'dir. Aynı yük talebi, şebeke üzerinden beslenmiş olsaydı ödenmesi gereken tutar 78,15₺ olacaktır. Buna göre şebeke maliyeti yakıt hücresi maliyetinin %62,5'ine denk gelmektedir.
- Orta güç talebi için aylık 478,8kWh'lik bir tüketim öngörülmüştür. Bu tüketim için gerekli işletme maliyeti 367,67₺ ve toplam bakım maliyeti ise 909,72₺ olacaktır. Toplamda ise maliyet 1.277,39₺ olacaktır. Aynı yük talebi için şebeke üzerinden beslenmiş olsaydı ödenmesi gereken tutar 917,96₺ olacaktır. Buna göre şebeke maliyeti yakıt hücresi maliyetinin %71,86'sına denk gelmektedir.
- Yüksek güç talebi için aylık 766,8kWh'lik bir tüketim öngörülmüştür. Bu tüketim için gerekli işletme maliyeti 588,83₺ ve toplam bakım maliyeti ise 1.456,92₺ olacaktır. Toplamda ise maliyet 2.045,75₺ olacaktır. Aynı yük talebi için şebeke üzerinden beslenmiş olsaydı ödenmesi gereken tutar 1.502,6₺ olacaktır. Buna göre şebeke maliyeti yakıt hücresi maliyetinin %73,44'üne denk gelmektedir.

Buradan da anlaşılacağı üzere, şebeke üzerinden beslemenin mümkün olduğu bir lokasyon için yakıt hücresi ile beslenmiş bir mesken %30-40 aralığında daha pahalı durumdadır.

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgar enerjisi için gerekli doğal olaylar düzensiz bir yapıda meydana gelmesine rağmen bazı parametreler ile tahmin edilebilir niteliktedirler (Sarı vd. 2021). Fakat, ihtiyaç anında emre amade bir güç olarak değerlendirilememektedirler. Bu durumlardan bağımsız bir yenilenebilir enerji kaynağı arayışlarında yakıt hücresi öne çıkmakta olsa bile yakıt olarak hidrojene ihtiyaç duyması en önemli dezavantajlarından birisidir. Fakat bu tür durumlarda kullanılması planlanan dizel ya da benzinli tip jeneratörler de kendine özgü yakıtlara ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca gürültülü yapıları ve sık bakım gerektirmeleri gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu durumlar düşünüldüğünde, sessiz çalışması ve sık bakım gerektirmemesi yakıt hücrelerini ön plana çıkarmaktadır ki bu ilk yatırım maliyetleri diğer jeneratörlerden daha yüksek olsa da konfor açısından tercih sebebi olmaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- APFCT, 2016, DuraPEM W240 User Manual, Document No: USRMAN DuraPEM W240 b2 .1, 20s.
- Aydemir, S, 1998, Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 141s, Edirne.
- Dhaarini D G, Sabeena M A, Shankar C, Kirbakaran V, Effect of Cell Temperature on the Power Output of a PEM Fuel Cell in a Test Bed Condition, 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2016, April 7-8, Nagercoil.
- Doğan R, Karaarslan A, The Application of Battery Charging Circuit using PEM Fuel-Cell, ISMSIT 1<sup>st</sup> International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 2017-1, October 21-23, Tokat.
- Doğan R, Karaarslan A, The Hybrid Control Method of Compound DC Motor using Fuel-Cell and Battery, ISMSIT 1<sup>st</sup> International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, 2017-2, October 21-23, Tokat.
- Dorer V, Weber R, Weber A, 2005, Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings, *Energy and Buildings*, 37, 1132-1146.
- Karaarslan A, Doğan R, 2017, Modeling and Control of DC-DC Buck Converter using PEM Fuel Cell, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6, 94-105.
- Li Y, Gao W, Zhang X, Ruan Y, Ushifusa Y, Hiroatsu F, 2020, Techno-economic performance analysis of zero energy house applications with home energy management system in Japan, *Energy & Buildings*, 214, article number 100862.
- Lohse-Busch H, Duoba M, Stutenberg K, Liev S, Kern M, 2017, Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai, Argonne National Laboratory, Report No: ANL/ESD-18/12.
- O'Hayre R (Ed.), Cha S W, Colella W G, Prinz, F B, 2016, *Fuel Cell Fundamentals*, Wiley & Sons Press, 583p, New Jersey, USA.

- Özkara Ö, Tokgöz N, Doğan R, Karaarslan A, 2017, The Analysis of OCC and PI Control Method for Isolated Fly-Back Converter using PEM Fuel Cells, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6, 40-49.
- Panapakidis I P, Sarafianos D N, Alexiadis M C, 2012, Comparative analysis of different grid-independent hybrid power generation systems for a residential load, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 551-563.
- Patterson M, Macia F N, Kannan A M, 2015, Hybrid Microgrid Model Based on Solar Photovoltaic Battery Fuel Cell System for Intermittent Load Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30, 359-366.
- Ronaszegi K, Fraga E S, Darr J, Shearing P R, Brett D J L, 2020, Application of Photo-Electrochemically Generated Hydrogen with Fuel Cell Based Micro-Combined Heat and Power: A Dynamic System Modelling Study, *Molecules*, 25, 123-144.
- Sarı A, Aktaş M, Yönetken A, Doğan R, 2021, Güneş Işınım Tahmininde NARX Modelinin Uygulanması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 4, 1-6.
- Shah A, Mohan V, Sheffield J W, Martin K B, 2011, Solar powered residential hydrogen fueling station, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 13132-13137.
- Sihem N, Sami B S, Bassam Z, Adnen C, 2019, Intelligent Energy Management Dedicated to Vehicle-To-Home Applications: A Realistic Autonomous Hybrid Power System Using a PEMFC, *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 12, 79-88.
- Swarnakar S C, Podder A K, Tariquzzaman M, Solar, Fuel Cell and Battery Based Hybrid Energy Solution for Residential Appliances, 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2019, December 20-22, Khulna, Bangladesh
- Şen Z, Karaosmanoğlu F, Şahin A D, 4. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 2002, Ekim 16-18, İstanbul.
- Tanuguchi A, Akita T, Yasuda K, Miyazaki Y, 2004, Analysis of electrocatalyst degradation in PEMFC caused by cell reversal during fuel starvation, *Journal of Power Sources*, 130, 42-49.



Uzunoğlu M, Onar O C, Alam M S, 2009, Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications, Renewable Energy, 34, 509-520.

Van Biert L, Godjevac M, Visser K ve Aravind P V, 2016, A review of fuel cell systems for maritime applications, Journal of Power Sources, 327, 345-364.

Weymouth T R, 1912, Problems in natural gas Engineering, Transaction of AIME 34, 185.

### **İnternet Kaynakları**

1- [https://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume2\\_Policy.pdf](https://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume2_Policy.pdf), 08.11.2021

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Muzaffer AKTAŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Sincan - 1980  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) : 5055052580 – muzaffer2580@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Fatih Teknik Meslek Lisesi, Elektronik Böl. (1996-1999)  
Lisans : Çankaya Üni., Elektronik-Haberleşme Müh. Böl., (2016–2019)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üni., Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı., (2019–2022)

### Çalıştığı Kurum ve Yıl

: TPAO (2010 – Devam Ediyor)

### Yayımları (SCI ve diğer) :

*SCI, SSCI ve AHCI Dışında Taranan Dergilerde Yayımlanan Makaleler*

- 1- Sarı A, Aktaş M, Yönetken A, Doğan R, 2021, Güneş Işınım Tahmininde NARX Modelinin Uygulanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 4, 1-6.